



DESAIN PENGENDALI *MODEL REFERENCE ADAPTIVE CONTROL* (MRAC) DENGAN KOMBINASI PD UNTUK MENGENDALIKAN KESEIMBANGAN PADA SISTEM *BALL AND BEAM*

TUGAS AKHIR

Diajukan Sebagai Salah Satu Syarat untuk Memperoleh Gelar Sarjana Teknik
pada Program Studi Teknik Elektro Fakultas Sains dan Teknologi



Oleh :

DIMAS PRASETYO

11355100048

**PROGRAM STUDI TEKNIK ELEKTRO
FAKULTAS SAINS DAN TEKNOLOGI
UNIVERSITAS ISLAM NEGERI SULTAN SYARIF KASIM RIAU
PEKANBARU**

2020

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber:
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar UIN Suska Riau.
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin UIN Suska Riau.



LEMBAR PERSETUJUAN

DESAIN PENGENDALI *MODEL REFERENCE ADAPTIVE CONTROL* (MRAC) DENGAN KOMBINASI PD UNTUK MENGENDALIKAN KESEIMBANGAN PADA SISTEM *BALL AND BEAM*

TUGAS AKHIR

oleh

DIMAS PRASETYO

11355100048

Telah diperiksa dan disetujui sebagai Laporan Tugas Akhir
Program Studi Teknik Elektro di Pekanbaru, pada tanggal 06 Agustus 2020

Ketua Program Studi Teknik Elektro

Ewi Ismaredah, S.Kom., M.Kom.
NIP. 197509222009122002

Pembimbing Tugas Akhir

Halim Mudia, S.T., M.T.
NIK. 130517053

- Hak Cipta Dilindungi Undang-Undang
1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber:
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar UIN Suska Riau.
 2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin UIN Suska Riau.



Hak Cipta Dilindungi Undang-Undang

© Hak Cipta milik UIN Suska Riau

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber:
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar UIN Suska Riau.
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin UIN Suska Riau.

LEMBAR PENGESAHAN

DESAIN PENGENDALI *MODEL REFERENCE ADAPTIVE CONTROL* (MRAC) DENGAN KOMBINASI PD UNTUK MENGENDALIKAN KESEIMBANGAN PADA SISTEM *BALL AND BEAM*

TUGAS AKHIR

Oleh:

DIMAS PRASETYO
11355100048

Telah dipertahankan di depan Sidang Dewan Penguji
sebagai salah satu syarat untuk memperoleh gelar Sarjana Teknik
Fakultas Sains dan Teknologi Universitas Islam Negeri Sultan Syarif Kasim Riau
di Pekanbaru, pada tanggal 06 Agustus 2020

Pekanbaru, 06 Agustus 2020

Mengesahkan,

Dekan Fakultas Sains dan Teknologi

Ketua Program Studi Teknik Elektro

Dr. Ahmad Darmawi, M.Ag
NIP. 196312141988031002

Ewi Ismaredah, S.Kom., M.Kom
NIP. 197509222009122002

DEWAN PENGUJI :

Ketua : Jufrizel, ST., MT
Sekretaris : Halim Mudia, ST., MT
Anggota I : Aulia Ullah, M.Eng
Anggota II : Ahmad Faizal, ST., MT



DESAIN PENGENDALI *MODEL REFERENCE ADAPTIVE CONTROL* (MRAC) DENGAN KOMBINASI PD UNTUK MENGENDALIKAN KESEIMBANGAN PADA SISTEM *BALL AND BEAM*

DIMAS PRASETYO

NIM : 11355100048

Program Studi Teknik Elektro
Fakultas Sains dan Teknologi
UIN Sultan Syarif Kasim Riau
Jl. H.R Soebrantas No.155 Pekanbaru

ABSTRAK

Kemajuan teknologi menghantarkan manusia kedalam kehidupan yang lebih mudah, dimana kemajuan teknologi merambah ke segala bidang mulai industri, medis, transportasi, dan lainnya. Kebutuhan transportasi yang menghantarkan manusia berpindah dari satu tempat ketempat yang lain menjadi salah satu kebutuhan mendasar di era modern saat ini, mulai dari transportasi darat, laut dan udara. Pesawat merupakan salah satu transportasi udara yang banyak digunakan saat ini karena lebih efisien dari segi waktu. Namun, tidak sedikit pengguna pesawat memiliki perasaan takut saat naik pesawat. Dimana perasaan takut terjadi saat *take off*, terbang maupun *landing*, yang sangat berhubungan dengan kestabilan, sehingga kestabilan gerak *vertical* dan *horizontal* pesawat saat penerbangan harus dikendalikan dengan baik. Prinsip kestabilan gerakan *vertical* dan *horizontal* pesawat dapat diambil dari sistem *ball and beam*. Sistem *Ball and Beam* adalah salah satu dari sistem pengendalian posisi. Ketidak mampuan sistem *Ball and Beam* untuk mencapai titik seimbang, di karenakan bola terus bergerak diatas batang penyeimbang ke bidang yang lebih rendah. Untuk mengendalikan system ini dibutuhkan kendali adaptif MRAC yang dapat mengatur sistem agar dapat berjalan sesuai keinginan. Dimana MRAC merupakan kendali adaptif yang mampu menghasilkan respon yang dapat mengikuti model referensinya. Model referensi merupakan model acuan yang karakteristiknya akan diikuti oleh respon plant. Namun, setelah menggunakan MRAC respon yang dihasilkan masih terdapat osilasi dan *overshoot*. Sehingga di butuhkan pengendali PD untuk memperbaiki respon nya. Nilai $K_p = 80$ dan nilai $K_d = 5$ dengan hasil *settling time* = 0.2568 detik dan *rise time* = 0.117 detik.

Kata Kunci : *Ball and Beam*, MRAC, Pesawat, PD.



DESIGN OF MODEL REFERENCE ADAPTIVE CONTROL (MRAC) COMBINATION PID CONTROLLER TO CONTROL THE BALANCE IN THE BALL AND BEAM SYSTEM

DIMAS PRASETYO

NIM : 11355100048

Department of Electrical Engineering

Faculty of Science and Technology

State Islamic University of Sultan Syarif Kasim Riau

H.R Soebrantas St. No. 155 Pekanbaru

ABSTRACT

Technological advancements deliver people into easier lives, where technological goals penetrate into all fields from industry, medical, transportation, and others. The need for transportation that transfers people from one place to another becomes one of the basic needs in the modern era, starting from land, sea and air transportation. The aircraft is one of the most widely used air transportation today because it is more efficient in terms of time. However, not a few aircraft users have a feeling of fear when boarding a plane. Where the feeling of fear occurs when take off, fly or landing, which is closely related to stability, so that the vertical and horizontal motion of the aircraft during flight must be controlled properly. The principle of stability of vertical and horizontal motion of the aircraft can be taken from the ball and beam system. Ball and Beam system is one of the position control systems. The inability of the Ball and Beam system to reach the point of equalization, because the ball continues to move above the counter weight to the lower plane. To control this system requires adaptive control of MRAC which can regulate the system so that it can run as desired. Where MRAC is an adaptive control that is able to produce responses that can follow the reference model. The reference model is a reference model whose characteristics will be followed by the plant response. However, after using MRAC the resulting response is still present oscillations and overshoot. So that PD controller is needed to improve its response. Kp value = 80 and Kd value = 5 with the result of settling time = 0.2568 seconds and rise time = 0.117 seconds

Keywords: *Airplane, Beam and Beam, MRAC, PD*



KATA PENGANTAR



Assalammu 'alaikum wa rahmatullahi wa barakatuh.

Alhamdulillah Rabbil Alamin, Puji syukur penulis panjatkan kepada Allah swt, berkat rahmat dan karunia yang telah dilimpahkan-NYA, sehingga penulis dapat menyelesaikan Proposal Tugas Akhir yang berjudul **“Desain Pengendali Model Reference Adaptive Control (MRAC) Dengan Kombinasi PD Untuk Mengendalikan Keseimbangan pada Ball And Beam”**. Shalawat beriringan salam semoga tetap tercurah kepada junjungan alam yakni Nabi Muhammad SAW. Tugas Akhir ini disusun sebagai salah satu syarat kelulusan dalam menyelesaikan Mata Kuliah **Tugas Akhir** di Prodi Teknik Elektro Universitas Islam Negeri Sultan Syarif Kasim Riau.

Banyak sekali pihak yang telah membantu dalam menyusun proposal tugas akhir ini, baik secara moril maupun materil. Untuk itu pada kesempatan ini penulis mengucapkan terimakasih kepada :

1. Kedua orang tuaserta Kakak dan Adik tercinta yang telah mendoa'akan serta memberikan semangat dan dorongan sehingga penulis dapat menyelesaikan proposal tugas akhir ini.
2. Bapak Prof. Dr. Akhmad Mujahidin, M.Ag selaku Rektor Universitas Islam Negeri Sultan Syarif Kasim Riau
3. Bapak Ahmad Darmawi, M.Ag. selaku Dekan Fakultas Sains dan Teknologi Universitas Islam Negeri Sultan Syarif Kasim-Riau
4. Ibu Ewi Ismaredah M.Kom selaku Ketua Jurusan Program Studi Teknik Elektro Fakultas Sains dan Teknologi Universitas Islam Negeri Sultan Syarif Kasim Riau
5. Bapak Mulyono ST,.MT selaku Sekretaris Jurusan Program Studi Teknik Elektro Fakultas Sains dan Teknologi Universitas Islam Negeri Sultan Syarif Kasim Riau
6. Bapak Hilman Zarory, M.Eng selaku Pembimbing Akademis yang selalu memberikan nasihat-nasihat yang sangat berguna bagi penulis



7. Bapak Halim Mudia, ST, MT selaku dosen pembimbing tugas akhir yang senantiasa telah banyak meluangkan waktu, tenaga dan pikiran untuk membimbing serta memotivasi penulis hingga dapat menyelesaikan proposal tugas akhir.
8. Bapak Aulia Ullah, M.Eng dan Bapak Ahmad Faizal, ST., MT selaku dewan penguji yang telah meluangkan waktu dan memberikan saran-saran agar Tugas Akhir penulis menjadi lebih baik.
9. Bapak / Ibu dosen Jurusan Teknik Elektro Fakultas Sains dan Teknologi Universitas Islam Negeri Sultan Syarif Kasim Riau yang tidak dapat penulis sebutkan satu-persatu yang telah memberikan ilmu dan motivasi dalam pelaksanaan tugas akhir ini.
10. Para sahabat Lambek Turun (Aqil Mar'i ST, Gilang Saputra ST, Haris Rizal ST, Ashar Wahidil Putra ST, Haris Saputra, Isep Rivaldi, M Fajri ST, M Hanafi ST, M Kamal ST, M A Reza, Reynaldi Syafitra, Septia Porda ST) yang selalu memberi semangat dan motivasi
11. Rekan-rekan Kosentrasi Elektronika Instrumentasi Teknik Elektro Universitas Islam Negeri Sultan Syarif Kasim Riau yang tidak dapat penulis sebutkan satu persatu yang telah memberikan semangat, dorongan, serta masukan untuk proposal tugas akhir ini.
12. Rekan-rekan Teknik Elektro Universitas Islam Negeri Sultan Syarif Kasim Riau yang tidak dapat disebutkan satu-persatu yang juga turut memberikan dorongan semangat kepada penulis untuk dapat menyelesaikan proposal tugas akhir.

Penulis menyadari dalam penulisan proposal tugas akhir ini masih banyak terdapat kekurangan serta kesalahan, untuk itu penulis mengharapkan adanya masukan berupa kritik maupun saran dari berbagai pihak untuk kesempurnaan proposal ini.

Penulis berharap semoga proposal tugas akhir ini dapat berguna dan bermanfaat bagi siapa saja yang membacanya.

Wassalamu'alaikumwarahmatullahiwabarakatuh.

Pekanbaru, Maret 2019

Penulis



DAFTAR ISI

	Halaman
COVER.....	i
ABSTRAK.....	ii
ABSTRACT	iii
KATA PENGANTAR	iv
DAFTAR ISI	vi
DAFTAR GAMBAR.....	vii
DAFTAR TABEL	viii
DAFTAR SIMBOL	ix
DAFTAR SINGKATAN	x
DAFTAR LAMPIRAN	xv
BAB I PENDAHULUAN	
1.1 Latar Belakang	I-1
1.2 Rumusan Masalah.....	I-3
1.3 Tujuan Penelitian	I-3
1.4 Batasan Masalah	I-3
1.5 Manfaat Penelitian	I-3
BAB II TINJAUAN PUSTAKA	
2.1 Penelitian Terkait	II-1
2.2 Landasan Teori.....	II-3
2.2.1 Sistem <i>Ball and Beam</i>	II-3
2.2.2 DC Servo Motor <i>Dynamic Model</i>	II-3
2.2.3 Model Matematika <i>Ball and Beam</i> Sistem	II-4
2.2.4 <i>Model Reference Adaptif Control (MRAC)</i>	II-6
2.2.4.1 <i>Teory MIT Rule</i>	II-7
2.2.5 <i>Proportional Derivative (PD)</i>	II-8
2.2.5.1 Pengendali <i>Proportional (P)</i>	II-9
2.2.5.2 Pengendali <i>Derivative (D)</i>	II-11
2.2.6 Metode Heuristik	II-13
2.2.7 Analisa Respon Transien	II-13
2.2.8 MATLAB	II-14
BAB III METODOLOGI PENELITIAN	



3.1 Proses Alur Penelitian.....	III-1
3.2 Tahapan Penelitian.....	III-2
3.3 Pengumpulan Data	III-4
3.4 Validasi Model Matematis	III-4
3.5 Perancangan Pengendali MRAC.....	III-5
3.5.1 Alur Perancangan Pengendali MRAC	III-5
3.5.2 Membuat Model Referensi.....	III-6
3.5.3 Perancangan Pengendali MRAC.....	III-8

BAB IV HASIL DAN ANALISA

4.1 Gambaran Umum Analisa.....	IV-1
4.1 Analisa pengendali MRAC dalam pencapaian <i>set point</i> pada sistem <i>Ball and Beam</i>	IV-1
4.1 Analisa pengendali MRAC-PD dalam pencapaian <i>set point</i> pada sistem <i>Ball and Beam</i>	IV-6

BAB V KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan	V-1
5.2 Saran	V-1

DAFTAR PUSTAKA



DAFTAR GAMBAR

Gambar	Halaman
2.1 Model <i>Ball and Beam</i>	II-3
2.2 Batang Penyeimbang Bola	II-4
2.3 Hubungan Antara Posisi Motor dan Sudut Balok	II-5
2.4 Blok diagram <i>Model Reference Adaptive Control (MRAC)</i>	II-7
2.5 Skema MRAC dengan Metode <i>MIT Rule</i>	II-8
2.6 Diagram Blok PID	II-9
2.7 Karakteristik Pengendali <i>Proportional</i>	II-9
2.8 Blok Diagram Pengendali <i>Proportional</i>	II-10
2.9 Respon Sistem (a) Tanpa Pengendali, (b) Pengendali P	II-10
2.10 Interpretasi Tindakan <i>Derivative</i> Sebagai Kendali Prediktif, Dimana Prediksi Diperoleh Dengan Ekstrapolasi Linier	II-11
2.11 Respon Sistem (a) Tanpa Pengendali, (b) Pengendali PD	II-12
2.12 Karakteristik Respon Orde Dua	II-13
2.13 Kurva Untuk Interpolasi Linier	II-15
2.14 Ikon Matlab	II-15
2.15 Bagian <i>Windows</i> Matlab	II-16
3.1 <i>Flow Chart</i> Penelitian	III-2
3.2 Diagram Blok Sistem <i>Ball and Beam</i>	III-4
3.3 Grafik Respon Sistem <i>Ball and Beam</i>	III-5
3.4 Grafik Model Referensi Sistem <i>Ball and Beam</i>	III-7
3.5 Desain MRAC Pada Sistem <i>Ball and Beam</i>	III-9
3.6 Hasil Keluaran MRAC	III-9
3.7 Grafik <i>Delay Time</i> Sistem <i>Ball and Beam</i> dengan Pengendali MRAC	III-10
3.8 Grafik <i>Rise Time</i> 10% Sistem <i>Ball and Beam</i> dengan Pengendali MRAC	III-10
3.9 Grafik <i>Rise Time</i> 90% Sistem <i>Ball and Beam</i> dengan Pengendali MRAC	III-11
3.10 Grafik <i>Settling Time</i> Sistem <i>Ball and Beam</i> dengan Pengendali MRAC	III-12
4.1. Desain MRAC pada Sistem <i>Ball and Beam</i>	IV-1
4.2. Hasil Grafik Keluaran MRAC	IV-2
4.3. Grafik <i>Delay Time</i> Sistem <i>Ball and Beam</i> dengan Pengendali MRAC	IV-2
4.4. Grafik <i>Rise Time</i> 10% Sistem <i>Ball and Beam</i> dengan Pengendali MRAC	IV-3
4.5. Grafik <i>Rise Time</i> 90% Sistem <i>Ball and Beam</i> dengan Pengendali MRAC	IV-4



4.6.	Grafik <i>Settling Time</i> Sistem <i>Ball and Beam</i> dengan Pengendali MRAC	IV-5
4.7.	Desain MRAC-PD pada Sistem <i>Ball and Beam</i>	IV-6
4.8.	Grafik Hasil Keluaran MRAC-PD	IV-9
4.9.	Grafik <i>Delay Time</i> Sistem <i>Ball and Beam</i> dengan Pengendali MRAC-PD.....	IV-9
4.10.	Grafik <i>Rise Time</i> 10% Sistem <i>Ball and Beam</i> Pengendali MRAC-PD	IV-10
4.11.	Grafik <i>Rise Time</i> 90% Sistem <i>Ball and Beam</i> Pengendali MRAC-PD	IV-11
4.12.	Grafik <i>Settling Time</i> Sistem <i>Ball and Beam</i> dengan Pengendali MRAC-PD..	IV-12

State Islamic University of Sultan Syarif Kasim Riau

State Islamic University of Sultan Syarif Kasim Riau



2. Dilarang mengemukakan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin UIN Suska Riau.
1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber:
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar UIN Suska Riau.



DAFTAR TABEL

Tabel		Halaman
2.1	<i>Ball and Beam</i> Sistem Parameter	II-6
2.2	Tanggapan Sistem Kendali PD Terhadap Perubahan Parameter	II-12
3.1	Jadwal Penelitian Tugas Akhir.....	III-10
4.1	Respon Waktu Sistem Menggunakan Pengendali MRAC	IV-5
4.2	Hasil Tuning Nilai <i>Gamma</i>	IV-6
4.3	Hasil Tuning Parameter PD	IV-8
4.4	Waktu Sistem Menggunakan Pengendali MRAC-PD	IV-12

2. Dilarang mengemukakan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin UIN Suska Riau.
- a. Penelitian hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
- b. Penelitian tidak merugikan kepentingan yang wajar UIN Suska Riau.

© Hak Cipta Dilindungi Undang-Undang

State Islamic University of Sultan Syarif Kasim Riau

State Islamic University of Sultan Syarif Kasim Riau

UIN SUSKA RIAU



DAFTAR SIMBOL

© Hak cipta milik UIN Suska Riau

State Islamic University of Sultan Syarif Kasim Riau

- = konstanta posisi
- = konstanta waktu
- = Gamma
- = Zheta
- = *Settling Time*
- = *Time Delay*
- = *Rise Time*
- = *Error Steady State*
- = *Konstanta Proportional*
- = *Konstanta Derivative*

Hak Cipta Dilindungi Undang-Undang

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber:

- a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
- b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar UIN Suska Riau.

2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin UIN Suska Riau.



DAFTAR SINGKATAN

PID	= <i>Proportional Integral Derivative</i>
MRAC	= <i>Model Reference Adaptive Control</i>
SMC	= <i>Sliding Mode Control</i>
CDM	= <i>Coefficient Diagram Method</i>
LQR	= <i>Linier Quadratic Control</i>
ZN	= Ziegler Nicolas
MATLAB	= <i>Matrix Laboratory</i>

© Hak cipta milik UIN Suska Riau

State Islamic University of Sultan Syarif Kasim Riau

Hak Cipta Milik UIN Suska Riau

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber:

- a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
- b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar UIN Suska Riau.

2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin UIN Suska Riau.



BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Kemajuan teknologi sudah menjadi kebutuhan penting manusia saat ini. Teknologi yang maju dapat memudahkan kehidupan manusia di segala bidang. Berakar dari berkembangnya ilmu pengetahuan, teknologi sudah menjadi identitas masyarakat modern. Teknologi merambah ke segala bidang dan memudahkan pekerjaan manusia baik itu dalam bidang industri, medis, transportasi, dan lainnya. Bidang transportasi menjadi salah satu bidang penting yang harus dikembangkan, karena digunakan untuk memindahkan manusia ataupun barang dari satu tempat ke tempat lain dalam waktu yang relatif cepat. Sarana transportasi yang sering menjadi pilihan adalah pesawat. Pesawat dipilih karena dinilai lebih efisien dari segi waktu. Namun, tidak sedikit konsumen memiliki perasaan takut saat akan naik pesawat. Perasaan takut ini berhubungan dengan kestabilan pesawat saat *take off*, terbang maupun *landing*. Untuk menstabilkan kenyamanan pada konsumen, maka kestabilan gerak *vertikal* dan *horizontal* pesawat saat penerbangan harus dikendalikan dengan baik. Prinsip dasar kestabilan gerakan *vertikal* dan *horizontal* pesawat ini dapat diambil dari sistem *ball and beam*.

Adapun Menjaga keseimbangan suatu objek terhadap objek lainnya merupakan salah satu acuan untuk menerapkan konsep sistem kendali pada faktor keseimbangan. Dalam prinsip dasar sistem kendali, pengendalian keseimbangan suatu sistem merupakan suatu hal yang sangat penting khususnya dalam aplikasi yang berkaitan dengan gerakan kestabilan. Kontrol sistem yang tidak stabil akan berdampak besar untuk banyak masalah kontrol. Karena jika sistem tidak stabil akan sangat membahayakan seperti dalam uji kontrol posisi vertikal pesawat dan ruang udara, dalam hal ini kita hanya dapat mempelajarinya di laboratorium dengan memodelkan sistem.

Sistem *Ball and Beam* juga disebut 'menyeimbangkan bola pada balok'. Ini umumnya terkait dengan masalah kontrol nyata seperti menstabilkan pesawat secara horizontal selama pendaratan dan aliran udara turbulen. Tujuan sistem adalah untuk mengontrol posisi bola ke titik referensi yang diinginkan, dan menolak gangguan seperti dorongan dari jari. Sinyal kontrol dapat diturunkan dengan memasukkan kembali informasi posisi bola. Sinyal tegangan kontrol menuju ke servomotor arus searah (DC), dan kemudian torsi yang



dihasilkan dari motor menggerakkan balok untuk memutar ke sudut yang diinginkan. Dengan demikian, bola bisa diletakkan di posisi yang diinginkan [1].

Sistem *Ball and Beam* adalah salah satu dari sistem pengendalian posisi, dimana prinsip kerjanya bola akan dapat bergerak bebas pada sebuah batang dan posisi dari perpindahan atau arah gerak bola tersebut dapat diatur sesuai dengan yang diinginkan atau dapat diartikan sifat sebuah bola akan bergerak ketempat yang lebih rendah apabila bola tersebut diletakkan pada tempat yang miring. Besarnya jarak perpindahan bola tersebut tidak dapat kita prediksi tergantungan besar kemiringan bidang tempat bola berada [2].

Masalah yang terjadi pada sistem *Ball and Beam* adalah tidak mampunya sistem untuk mencapai nilai *setpoint* yang diinginkan. Terdapat beberapa penelitian terkait sistem *Ball and Beam* diantaranya: pengendalian sistem *Ball and Beam* menggunakan pengendali PID. Pada penelitian tersebut menghasilkan kondisi kestabilan yang diinginkan tetapi terdapat *overshoot* yang besar dan masih memerlukan waktu yang cukup lama untuk mencapai *output steady state* dari waktu sebesar 8 detik [3].

Penelitian tentang pengendalian posisi *ball and beam* dengan menggunakan kombinasi pengendali PID-LQR. Hasil dari keluaran sistem menunjukkan kestabilan yang diinginkan, akan tetapi masih terdapat *error* yang besar pada detik ke 3,958 [4].

Kemudian penelitian sistem *ball and beam* menggunakan *Coefficient Diagram Method* (CDM) - PID dan Ziegler Nicolas (ZN)-PID. Pada penelitian ini dijelaskan bahwa pengendalian posisi menggunakan pengendali CDM-PID masih menghasilkan gangguan waktu yang lebih lama. Hasil dari keluaran sistem menunjukkan *overshoot* yang besar dari waktu simulasi sebesar 40 detik [5].

Dari beberapa penelitian terkait masih menunjukkan bahwa sistem *ball and beam* merupakan sistem yang tidak stabil dan masih menunjukkan respon sistem yang lambat. Oleh karena itu dibutuhkan suatu pengendali untuk mempercepat respon sistem yaitu *Model Reference Adaptive Control* hal ini dikarenakan MRAC merupakan salah satu skema kendali adaptif dimana performansi keluaran sistem yang dapat mengikuti performansi keluaran model referensinya. Dalam MRAC, perilaku *plant* yang diinginkan dijelaskan oleh model referensinya. Model referensi merupakan model acuan yang karakteristiknya akan diikuti oleh respon *plant*. Pada MRAC terdapat mekanisme kendali adaptif yang bertujuan untuk mengendalikan keluaran dari *plant* sama dengan model referensinya [6]. Setelah itu untuk mempercepat respon *plant* yang dihasilkan dengan menggunakan pengendali MRAC maka akan dirancang model referensi dengan respon



sistem yang lebih cepat dan pengaturan mekanismenya yang tepat agar dapat mencapai model referensinya.

Pada penelitian pendahuluan Sistem *Ball and Beam* dengan menggunakan pengendali MRAC menghasilkan respon yang cukup baik yang pada detik ke 9 mencapai nilai *setpoint* yang diinginkan dengan berkurangnya *overshoot* pada sistem. Respon yang dihasilkan masih dapat diperbaiki dengan mengkombinasikan pengendali MRAC dengan pengendali PD untuk membantu MRAC dalam mengendalikan *plant* mencapai respon yang diinginkan.

Pengendali PD memiliki strukturnya yang sederhana, dan tujuan kendali yang berbeda dapat diperoleh dengan menyesuaikan parameter PD. Pengendali PD terdiri dari dua macam pengendali yaitu *proportional* dan *derivative*. Dimana dua pengendali ini disusun secara parallel. Pengendali *proportional* dapat mempercepat *rise time* dan pengendali *derivative* mempercepat *settling time* serta dapat mereduksi *overshoot* yang dihasilkan oleh sistem [7].

Berdasarkan beberapa studi literatur yang membahas tentang kombinasi MRAC dan PD [8][9][10]. Kombinasi pengendali ini mampu mempercepat sistem dan menstabilkan sistem. Sehingga pada penelitian ini yang mengendalikan keseimbangan dari sistem *Ball and Beam* menggunakan pengendali MRAC dengan metode *MIT Rule* dan di kombinasikan dengan pengendali PD menggunakan metode heuristik.

Dengan beberapa kajian tersebut penulis akan melakukan penelitian tugas akhir dengan judul : **“Desain Pengendali *Model Reference Adaptive Control* (MRAC) Dengan Kombinasi PD Untuk mengendalikan Keseimbangan Sistem *Ball and Beam*”**

1.2 Rumusan Masalah

Berdasarkan uraian dari latar belakang didapatkan rumusan masalah pada penelitian ini adalah tidak mempunyai sistem untuk mencapai nilai *setpoint* yang diinginkan dan mengatasi masalah respon sistem serta melihat pengaruh pengendali MRAC dan PD terhadap performa sistem *Ball and Beam*.

1.3 Tujuan Penelitian

Adapun tujuan dari penelitian ini adalah mendesain pengendali MRAC dengan PD untuk mengendalikan posisi pada *Ball and Beam* sehingga menghasilkan respon sistem yang diinginkan.



1.4 Batasan Masalah

Pembahasan penelitian ini dilakukan dengan batasan masalah sebagai berikut:

1. Parameter yang dikendalikan adalah posisi pada system *Ball and Beam*.
2. MRAC menggunakan metode MIT *rule* dan tuning PD menggunakan metode heuristic.
3. Simulasi MRAC menggunakan MRAC dua *gamma*.
4. Simulasi pada sistem ini tidak menggunakan gangguan.
5. Simulasi menggunakan *software* MATLAB.

1.5 Manfaat Penulisan

1. Sebagai referensi tambahan bagi peneliti-peneliti berikutnya.
2. Menghasilkan desain pengendali MRAC dan PD untuk pengendalian posisi Pada Sistem *Ball and Beam*.
3. Dapat menjadi referensi untuk penerapan pengendali dalam proses industry.

Hak Cipta Dilindungi Undang-Undang



BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Penelitian Terkait

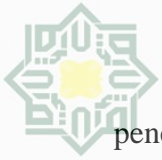
Dalam penelitian Tugas Akhir ini dilakukan studi literatur yang merupakan pencarian teori serta referensi yang berhubungan dengan kasus serta permasalahan yang akan diselesaikan, teori dan referensi didapat dari jurnal, paper, buku dan sumber lainnya.

Ada beberapa penelitian yang dilakukan tentang system *ball and beam* diantaranya: Penelitian dengan judul *Fractional Order Feedback Control of a Ball and Beam Sistem*. Hasil penelitian menunjukkan kendali PID dapat diterapkan pada system *ball and beam* dan menghasilkan kondisi kestabilan yang diinginkan, tapi terdapat *overshoot* dan lambat mencapai *output steady state*, system respon dengan *fractional order PID controller* menghasilkan respon yang lebih baik dari *PID controller classic* dinyatakan dengan *PID fractional* menghasilkan waktu *Rise Time* pada detik ke 2 dan *Overshoot* yang besar, sedangkan *PID Controller Classic* menghasilkan *Rise Time* pada detik ke 8 dan *Overshoot* yang besar [2].

Kemudian penelitian dengan judul *Modeling and control of ball and beam sistem Using Model Based and non-linear Based Control Approaches* menggunakan kombinasi *PID-LQR*. Hasil keluaran menunjukkan kestabilan yang diinginkan, tetapi masih terdapat *error* yang belum stabil. Hasil keluaran *PID-LQR Settling Time* 3.958 detik dan *steady state error* yang besar [3].

Selanjutnya penelitian sistem *Ball and Beam* menggunakan *Coefficient Diagram Method* (CDM) - PID dan Ziegler Nicolas (ZN)-PID. Hasil menunjukkan bahwa kontroler CDM-PID dapat mempertahankan stabilitas yang baik dari posisi bola dengan persentase yang lebih rendah dari pada ZN-PID kontroler. Tujuan penelitian ini adalah membandingkan metode penalaan Ziegler-Nichols PID dengan metode CDM-PID. Dari hasil simulasi, dapat diamati bahwa kontroler CDM-PID dapat meredam gangguan dalam waktu yang lebih singkat dengan puncak yang lebih sedikit dan tidak terpengaruh oleh variasi *gain* sedangkan ZN-PID dipengaruhi oleh *non linearitas*. Didapatkan analisa CDM-PID adalah *Setling Time* = 1.18 detik sedangkan untuk ZN-PID *Setling Time* = 15.38 detik. [4].

Penelitian yang berjudul “desain dan Implementasi Kontrol PID *Model Reference Adaptive Control* untuk *Automatic Safe Landing* Pada Pesawat UAV *Quadcopter*”, pada



penelitian ini perhitungan parameter kontroler pada *direct* MRAC terjadi dengan mempertimbangkan perbandingan *input* dan *output* plant. Pada penelitian ini menggunakan pengendali PID untuk menghitung nilai kesalahan sebagai perbedaan antara variabel proses terukur dan *set point* yang diinginkan. Setelah dilakukan simulasi menggunakan pengendali MRAC menghasilkan *output* yang dapat mempertahankan respon walaupun terjadi perubahan parameter *plant*. Spesifikasi performansi sistem pengendalian dengan kontroler PID-MRAC pada hasil simulasi adalah $\tau = 0.4$ detik, $\tau_s = 2$ detik, $\tau_r = 1.17$ detik, $\tau_d = 0.99$ detik, waktu *steady state* yaitu 2.2 detik dan dalam implementasi menghasilkan respon $\tau = 1.125$ detik, $\tau_s = 2.23$ detik, $\tau_r = 3.31$ detik, $\tau_d = 2.79$ detik dan waktu *steady state* yaitu 1.575 detik [9].

Penelitian yang berjudul “Desain kendali MRAC dengan kombinasi PID untuk mengendalikan kecepatan pada sistem motor DC”. Pada penelitian ini menggunakan pengendali MRAC dengan metode MIT-rule dan pengendali PID dengan menggunakan metode heuristik. Pada penelitian ini dibandingkan respon sistem dengan menggunakan pengendali MRAC dan kombinasi MRAC-PID. Respon sistem dengan menggunakan pengendali MRAC menghasilkan nilai *Rise time* 1.7934 detik dan *settling time* 5.94755, sedangkan dengan menggunakan pengendali kombinasi PID menghasilkan nilai *Rise Time* 0.0726 detik dan *Settling Time* 0.2735. Dapat dilihat bahwa respon sistem yang ditunjukkan pengendali MRAC dengan kombinasi PID menghasilkan respon yang lebih cepat dibandingkan dengan hanya menggunakan pengendali MRAC [10].

Penelitian yang berjudul “Desain pengendali MRAC-PID untuk mengendalikan posisi pada sistem *magnetic levitation ball* “. Pada penelitian ini digunakan pengendali MRAC dengan metode MIT dan pengendali PID untuk memperbaiki respon sistem yang dihasilkan oleh pengendali MRAC. Pada penelitian ini dilakukan perbandingan respon sistem menggunakan pengendali MRAC dan pengendali MRAC-PID. Respon yang dihasilkan pengendali MRAC-PID lebih cepat dengan nilai *rise time* 0.0196 detik dan *settling time* 0.0849 detik sedangkan dengan hanya menggunakan pengendali MRAC menghasilkan nilai *rise time* 1.6635 detik dan *settling time* 2.6382 detik [11].

Berdasarkan dari beberapa referensi yang penulis dapat maka akan dirancang pengendali MRAC untuk mengendalikan posisi pada Sistem *Ball and Beam* dengan dikombinasikan menggunakan pengendali PID agar kekurangan respon sebelumnya dapat teratasi.



2.2 Landasan Teori

2.2.1 Sistem *Ball and Beam*

Sistem *Ball and Beam* adalah salah satu sistem yang sangat penting dalam mempelajari sistem kontrol. Pergerakan bola pada bidang miring yang merupakan model dari *Ball and Beam*[1]. Pada sistem *Ball and Beam*, pergerakan bola dipengaruhi oleh besarnya gaya yang ditimbulkan oleh kemiringan batang tempat bola berada, dimana untuk memiringkan batang digunakan motor yang akan menggerakkan batang tersebut sesuai dengan posisi bola.

2.2.2 DC Servo Motor Dynamic Model

Pemodelan *servomotor* DC dapat dibagi menjadi listrik dan dua subsistem mekanis.

Subsistem listrik berbasis pada hukum tegangan Kirchhoff:

$$Lm \dot{I}_m + Rm I_m + Kb \theta = U$$

(2.1)

Dimana U adalah tegangan *input*, I_m adalah arus, R_m dan L_m adalah resistansi dan induktansi, K_b adalah konstanta emf dan θ adalah kecepatan sudut. Karena dibandingkan dengan $R_m I_m$ dan $K_b \theta$, istilah $L_m \dot{I}_m$ sangat Kecil, oleh karena itu untuk mempermudah pemodelan. Persamaan (2.1) menjadi

$$Rm I_m + Kb \theta = U$$

(2.2)

Subsistem mekanis diberikan oleh :

$$\frac{1}{K_g} (J_m \ddot{\theta} + B_m \dot{\theta}) = \tau_m$$

(2.3)

Dimana K_g adalah rasio *gearbox*, J_m adalah momen efektif *inersia*, B_m adalah koefisien gesekan viskos, τ_m adalah torsi poros motor. Subsistem listrik dan mekanik digabungkan ke masing-masing lainnya melalui persamaan torsi aljabar

$$\tau_m = K_m I_m$$

(2.4)

Dimana K_m adalah konstanta torsi motor menggunakan (2.4), (2.3) dapat ditulis sebagai



$$\frac{1}{K_g} (J_m \ddot{\theta} + B_m \dot{\theta}) = k_m I_m$$

$$I_m = \frac{(J_m \ddot{\theta} + B_m \dot{\theta})}{K_m k_g} \quad (2.5)$$

Dengan mensubstitusikan nilai I_m ke (2.2), persamaan *diferensial* untuk model motor DC diperoleh sebagai

$$\frac{R_m + B_m}{K_m k_g} \ddot{\theta} + \left(K_b + \frac{R_m + B_m}{K_m K_g} \right) \dot{\theta} = U \quad (2.6)$$

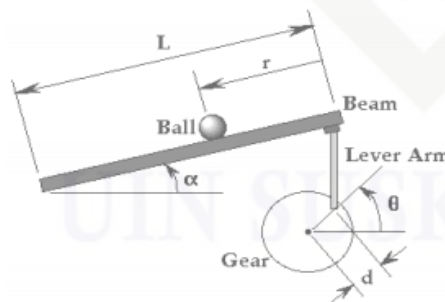
Mengambil transformasi *Laplace* (2.6), model servomotor DC untuk sistem *Ball and Beam* diperoleh sebagai

$$\frac{R_m + J_m}{K_m k_g} s^2 \theta + \left(K_b + \frac{R_m + B_m}{K_m K_g} \right) s \theta(s) = U(s)$$

$$\frac{\theta(s)}{U(s)} = \frac{K_m K_g}{R_m + J_m s^2 + (R_m + B_m + K_b K_m K_g) s} \quad (2.7)$$

2.2.3 Model Matematika *Ball and Beam* Sistem

Sistem *Ball* dalam sistem batang penyeimbang bola, sebuah bola yang diletakkan di atas batang dapat bergerak bebas sepanjang batang tersebut. Batang dihubungkan dengan sebuah motor yang dilengkapi dengan *gearbox* sehingga jika *gearbox* motor berputar dengan sudut θ , maka sudut batang akan berubah sebesar α . Pada saat posisi batang tidak lagi *vertical*, gaya gravitasi akan menyebabkan bola bergerak sepanjang batang



Gambar 2.2. Batang Penyeimbang Bola [2]



Bila diasumsikan bola bergerak tanpa slip dan gesekan, maka dari gambar di atas diperoleh persamaan untuk gerakan bola yaitu

$$\left(\frac{J}{R^2} + m\right) \ddot{x} + M_g \sin \alpha - m_x(\alpha^2) = 0 \quad (2.8)$$

Persamaan (2.8) dilariskan tentang sudut balok $\alpha = 0$, yang mana memberikan pendekatan linier berikut dari sistem

$$\left(\frac{J}{R^2} + m\right) \ddot{x} = -m g \alpha \quad (2.9)$$

Karena sudut balok α dan sudut gear θ tidaksama, oleh karena itu Gbr.3 digunakan untuk menghitungnya.



Gambar 2.3. Hubungan antara posisi motor dan sudut balok [2]

Jarak di dua lingkaran sama oleh karena itu, persamaan yang menghubungkan sudut balok α dengan sudut gear θ dapat didekati oleh hubungan linier:

$$\alpha L = \theta d$$

$$\alpha = \frac{d}{L} \theta \quad (2.10)$$

Dengan transformasi Laplace maka transfer function dari xposisi bola ($X(s)$) terhadap sudut gearbox ($\theta(s)$) adalah

$$\left(\frac{J}{R^2} + m\right) \ddot{x} = -m g \frac{d}{L} \theta \quad (2.11)$$

$$\left(\frac{J}{R^2} + m\right) X(s) S^2 = -m g \theta \frac{d}{L}(s) \quad (2.12)$$

$$\frac{X(s)}{\theta(s)} = \frac{-m g d}{L S^2 \left(\frac{J}{R^2} + m\right)}$$

Kemudian *transfer finction* (2.12) untuk *ball and beam* adalah sebagai berikut

$$\frac{X(s)}{\theta(s)} = \frac{-0.11 \times -9.8 \times 0.4}{0.4 \times \left(\frac{2 \times 0.11}{5} + 0.11 \right) \times s^2}$$

$$TF = \frac{0.7}{s^2}$$

(2.13)

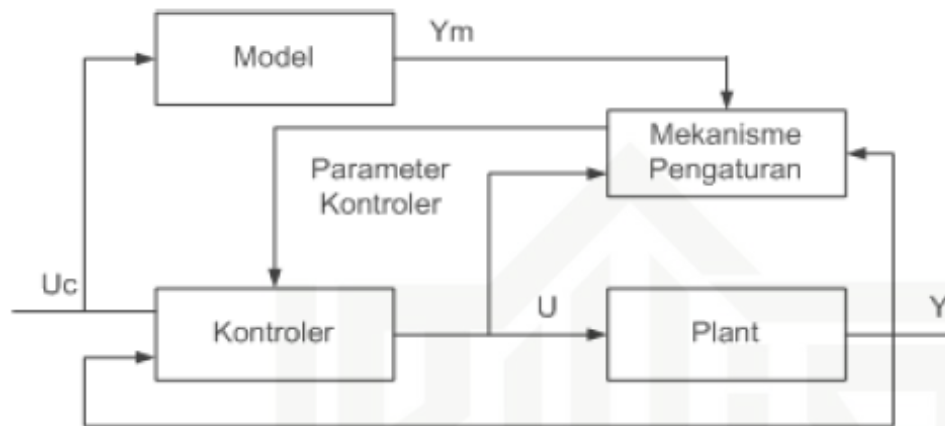
Table 2.1. *Ball and Beam sistem parameters* [2]

Symbol	Quantity	Value
G	Gravity acceleration	-9.8 (m/s ²)
M	Ball mass	0.011 (kg)
R	Ball radius	0.015 (kg)
L	Beam length	0.4 m
D	Lever length	0.04 m
Δ	Equilibrium point of ball position	0.2 m

2.2.4 Model Reference Adaptive Control (MRAC)

Sistem kendali adaptif bisa secara luas dijelaskan sebagai sistem kendali yang memiliki kemampuan untuk menyesuaikan desain kendali parameter seperti kendali *online* berdasarkan input yang diterima. Pengendali adaptif juga merupakan pengendali dengan parameter yang dapat disesuaikan dan mekanisme untuk menyesuaikan parameter. Sistem kendali adaptif memiliki dua *loop*, satu *loop* adalah *feedback* normal dengan proses dan *loop* lainnya adalah penyesuaian parameter. Sistem kendali adaptif sangat menguntungkan untuk merancang sistem kendali dengan peningkatan kinerja dan fungsionalitas [12].

Model Reference Adaptive Controller (MRAC) merupakan salah satu skema kendali adaptif dimana performansi keluaran sistem mengikuti performansi keluaran model referensinya. MRAC dapat dianggap sebagai sistem servo adaptif dimana kinerja yang diinginkan dinyatakan dalam bentuk model referensi, yang memberikan respon yang diinginkan terhadap sinyal perintah. Berikut blok diagram pengendali MRAC [13].



Gambar 2.7 Blok Diagram *Model Reference Adaptive Control* (MRAC) [13]

Skema sistem MRAC memiliki dua *loop* yaitu *loop* pertama yang merupakan *loop* umpan balik antara proses dan kontroler sedangkan *loop* kedua adalah *loop* yang mengubah parameter-parameter kontroler berdasarkan kesalahan, yang merupakan perbedaan antara *output* dari sistem dan *output* model referensi yang dapat dinyatakan dalam bentuk $e = y - y_m$. *Loop* umpan balik biasanya disebut dengan *loop* dalam (*inner loop*) dan *loop* penyesuaian parameter disebut dengan *loop* luar (*outer loop*). Dalam MRAC perilaku yang diinginkan dari suatu sistem ditentukan oleh model, dan parameter dari pengendali yang disesuaikan berdasarkan kesalahan, yang merupakan perbedaan antara *loop* tertutup dan model [13].

2.2.5 Teory MIT Rule

MIT Rule merupakan pendekatan asli pengendali MRAC. *MIT Rule* pada sistem *loop* tertutup yang mana kontrolernya memiliki satu parameter yang dapat diatur berupa θ . Respon sistem *loop* tertutup ditentukan oleh model yang keluarannya dinotasikan y_m , *output* proses dinotasikan sebagai y . *Error* merupakan selisih antara keluaran y dari sistem *loop* tertutup dan keluaran dari model y_m . *Error* dinotasikan sebagai e . Pengaturan parameter dilakukan dengan meminimalkan fungsi kerugian (*The loss function*, $J(\theta)$):



$$J(\theta) = \frac{1}{2} s^2 \quad (2.14)$$

Agar J kecil dilakukan pengubahan parameter gradien negatif dari J , Selanjutnya, persamaan untuk memperbarui θ disebut sebagai fungsi turunan sensitivitas.

$$\frac{d\theta}{dt} = -\gamma \frac{\partial J}{\partial \theta} = -\gamma e \frac{\partial e}{\partial \theta} \quad (2.15)$$

Kemudian diasumsikan bahwa pengendali memiliki umpan balik adaptif (θ_1) dan (θ_2) Selanjutnya adalah menurunkan umpan balik adaptif (θ_1) dan (θ_2) untuk mendapatkan y_{plant} . Namun, *input* u dapat ditulis ulang menggunakan kedua umpan balik, umpan balik ini bisa digunakan untuk mendapatkan persamaan y_{plant} .

$$u = \theta_1 u_c - \theta_2 y_{plant} \quad (2.16)$$

$$e = y_{plant} - y_{model} = G_p u - G_m u_c \quad (2.17)$$

$$y_{plant} = G_p u = \left(\frac{b}{s^2 + a_1 s + a_0} \right) (\theta_1 u_c - \theta_2 y_{plant}) \quad (2.18)$$

$$y_{plant} = \left(\frac{b \theta_1}{s^2 + a_1 s + a_0 \theta_1 + b \theta_2} \right) u_c$$

Selanjutnya adalah mencari nilai error dengan mengambil turunan parsial *error* dengan nilai (θ_1) dan (θ_2). Dimana nilai u_c tidak termasuk parameter, oleh karena itu tidak penting saat mengevaluasi turunannya

$$e = \left(\frac{b \theta_1}{s^2 + a_1 s + a_0 \theta_1 + b \theta_2} \right) u_c - G_m u_c \quad (2.19)$$

$$\frac{\partial e}{\partial \theta_1} = \left(\frac{b \theta_1}{s^2 + a_1 s + a_0 \theta_1 + b \theta_2} \right) u_c \quad (2.20)$$



$$\frac{\delta e}{\delta \theta_2} = - \left(\frac{b^2 \theta_1}{s^2 + a_1 s + a_0 \theta_1 + b \theta_2} \right) u_c \quad (2.21)$$

$$= - \left(\frac{b^2}{s^2 + a_1 s + a_0 \theta_1 + b \theta_2} \right) y_{plant}$$

Turunan sensitivitas yang di peroleh mengandung parameter dari *plant*. Jika modelnya mendekati *plant* actual, karakteristik model dapat di sesuaikan dengan karakteristik *plant*, sehingga memberikan turunan sensitivitas sebagai berikut :

$$s^2 + a_1 s \theta_1 + a_0 + b \theta_2 \approx s^2 + a_{1m} s + a_{0m} \quad (2.22)$$

Mengambil turunan dari umpan balik MRAC, maka didapatkan

$$\frac{\delta e}{\delta \theta_1} = \frac{a_{1m} s + a_{0m}}{s^2 + a_{1m} s + a_{0m}} u_c \quad (2.23)$$

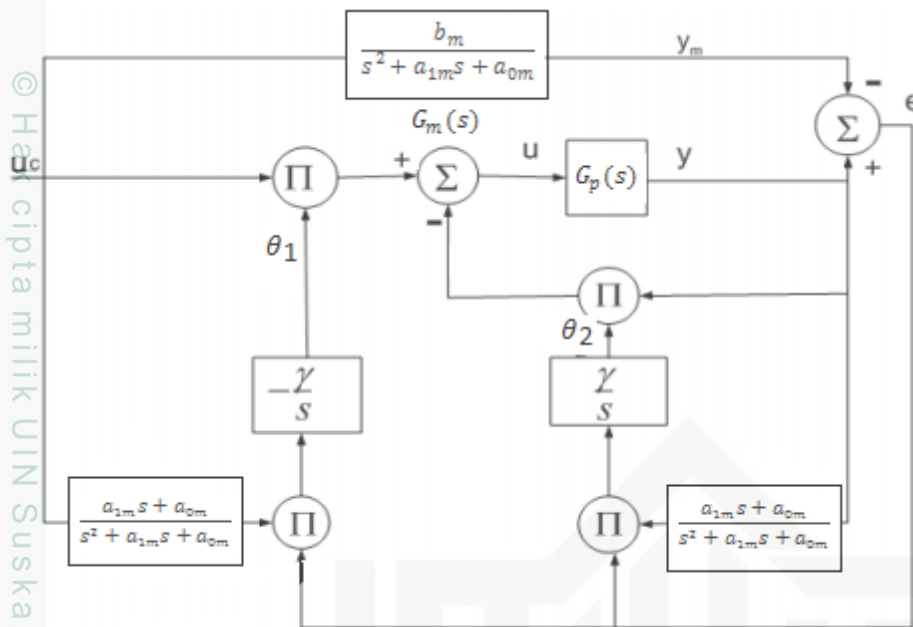
$$\frac{\delta e}{\delta \theta_2} = - \frac{a_{1m} s + a_{0m}}{s^2 + a_{1m} s + a_{0m}} y_{plant} \quad (2.24)$$

Selanjutnya adalah menerapkan MIT *Rule*, aturan update parameter untuk masing-masing θ diturunkan. Sehingga untuk *filter* nilai *error* dan γ menjadi :

$$\frac{d\theta_1}{dt} = -\gamma \frac{\delta e}{\delta \theta_1} e = -\gamma \left(\frac{a_{1m} s + a_{0m}}{s^2 + a_{1m} s + a_{0m}} u_c \right) e \quad (2.25)$$

$$\frac{d\theta_2}{dt} = -\gamma \frac{\delta e}{\delta \theta_2} e = \gamma \left(\frac{a_{1m} s + a_{0m}}{s^2 + a_{1m} s + a_{0m}} y_{plant} \right) e \quad (2.26)$$

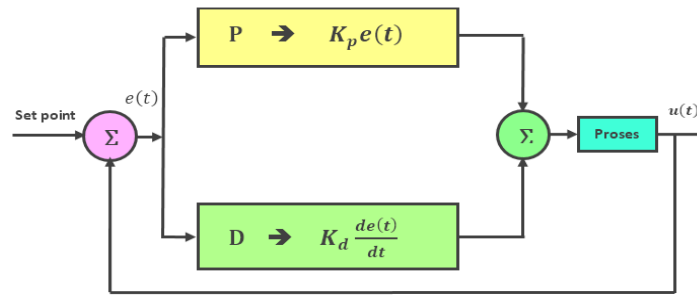
Sehingga berdasarkan persamaan matematis yang sudah diturunkan diatas maka didapatkan skema MRAC dengan gamma sebagai berikut :



Gambar 2.8 Skema MRAC dengan Metode MIT Rule [13]

2.2.5 Proportional Derivative (PD)

Pengendali dapat dikatakan sebagai otak dalam operasi sistem, salah satu contoh pengendali yang sering digunakan dalam industry adalah pengendali PID. Pengendali PID juga dikenal dengan istilah *three-term control*. PID merupakan kombinasi dari 3 pengendali yaitu *proportional*(P), *integrator* (I), dan *derivative*(D) yang masing-masingnya mempunyai kemampuan dalam mengendalikan suatu proses dalam sistem. PID merupakan sebuah pengendali yang memiliki algoritma yang paling sederhana dan umum digunakan serta memiliki banyak bentuk persamaan. Algoritma PID dapat didekati dari berbagai arah, ini dapat dilihat PID mampu beroperasi dengan beberapa aturan praktis. Tapi juga dapat di dekati dengan analitis. Dalam penerapan nya tidak harus menggunakan 3 pengendali ini, penggunaan pengendali tergantung kepada kebutuhan. Dapat menggunakan pengendali P, PI, PD, ataupun PID [7]. Diagram blok dari pengendali PD adalah sebagai berikut:

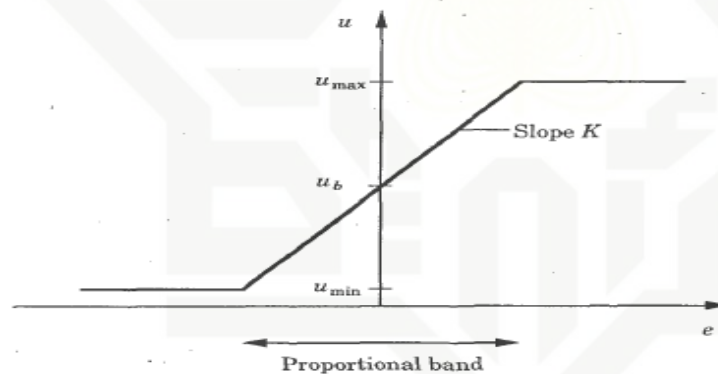


Gambar 2.9 Diagram Blok PD [7]

Pengendali PD merupakan jumlah dari keluaran pengendali *proportional*, dan keluaran pengendali *derivative*. Karakteristik pengendali PD sangat dipengaruhi oleh kontribusi besar ketiga parameter dari P dan D. *Error* merupakan hasil kurang dari hasil penjumlahan kedua pengendali dengan *input* dari sistem.

2.2.5.1 Pengendalian *Proportional* (P)

Sistem kendali *on-off* sering mengakibatkan osilasi, hal ini disebabkan karena sistem telah melampaui batas yang disebabkan karena terjadi perubahan kecil pada *error* yang menyebabkan perubahan variabel manipulasi pada rentang penuh.



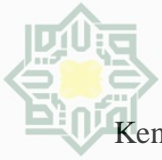
Gambar 2.10 Karakteristik Pengendali *Proportional* [14]

Persamaan matematis pengendali *proportional*(P) adalah [7]

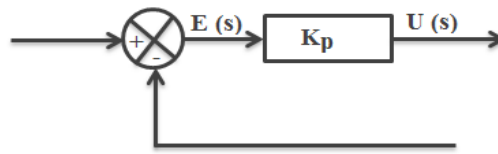
$$u(t) = K_p \cdot e(t) \quad (2.27)$$

Dimana K_p merupakan konstanta *proportional* yang dalam persamaan *laplace* dapat ditulis sebagai berikut [7]

$$\frac{U(s)}{E(s)} = K_p \quad (2.28)$$



Kendali *proportional* dikenal sebagai *gain* / penguat. Blok diagram untuk pengendali *proportional* dapat digambarkan seperti

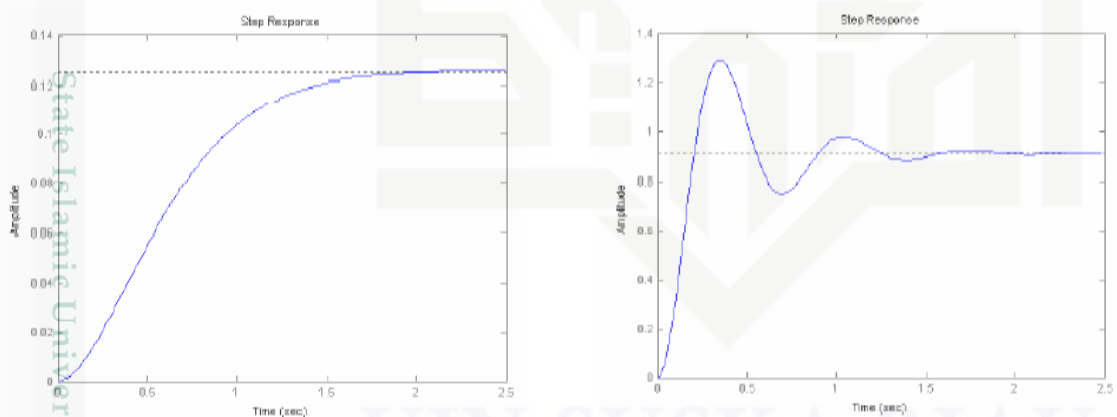


Gambar 2.11 Blok Diagram Pengendali *Proportional* [7]

Efek yang ditimbulkan oleh pengendali *proportional* saat di aplikasikan pada sistem adalah sebagai berikut :

1. Menambah atau mengurangi kestabilan, ditandai dengan *overshoot*.
2. Memperbaiki respon transien, khususnya : *rise time* dan *settling time*
3. Mengurangi *error steady state*, untuk mengurangi E_{ss} dibutuhkan nilai K_p yang besar namun akan membuat sistem menjadi tidak stabil. Kendali *proportional* memiliki nilai yang sebanding dengan *error* ,dimana semakin besar nilai *error* maka semakin besar nilai sinyal kendali yang dihasilkan[14]

Kendali *proportional* dapat menghasilkan *offset* pada sistem. Dimana *offset* pada sistem dapat dilakukan dengan memperbesar nilai *proportional band* atau K_p . Namun, nilai K_p yang terlalu besar akan menyebabkan sistem menjadi tidak stabil yang ditandai dengan timbulnya osilasi pada sistem. Kendali P dapat berdiri sendiri untuk pengendalian sistem.



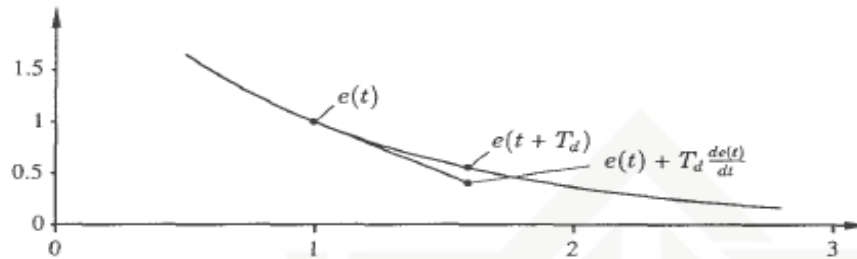
Gambar 2.12 Respon Sistem (a) Tanpa Pengendali, (b) Pengendali P [14]

2.2.5.2 Pengendalian *Derivative* (D)

Tujuan dari pengendali *derivative* adalah untuk memperbaiki stabilitas *loop* tertutup. Mekanisme kestabilan dapat digambarkan secara intuitif. Karena dinamika



proses, diperlukan waktu sebelum terjadi perubahan variabel kendali yang terlihat pada *output*. Dengan demikian, sistem kendali akan terlambat mengoreksi kesalahan. Tindakan pengontrol dengan aksi *proportional* dan *derivative* mungkin terjadi seolah-olah kendali dibuat sebanding dengan yang diprediksi oleh *output* proses, dimana prediksi dibuat dengan mengekstrapolasi kesalahan dengan garis singgung pada kurva kesalahan [7].

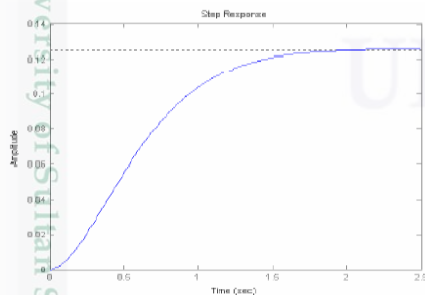


Gambar 2.15 Interpretasi Tindakan *Derivative* Sebagai Kendali Prediktif, Dimana Prediksi Diperoleh Dengan Ekstrapolasi Linier [7]

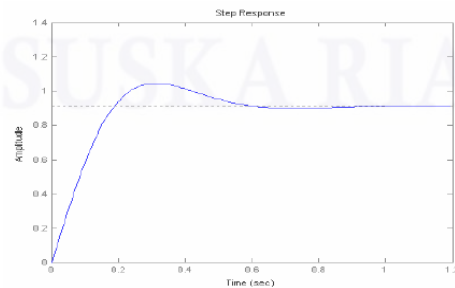
Pengaruh kendali *derivative* terhadap sistem adalah :

1. Kecepatan respon lebih tinggi (dibandingkan dengan mode P).
2. Sangat sensitive terhadap *noise* dan gangguan frekuensi tinggi.
3. Kendali *derivative* hanya berubah saat ada perubahan *error*, sehingga saat ada *error* statis D tidak beraksi. Sehingga D tidak boleh digunakan sendiri
4. Besarnya sinyal kendali sebanding dengan perubahan *error* (Δe). Semakin cepat *error* berubah, semakin besar aksi kendali yang ditimbulkan
5. Mengurangi *overshoot* dan waktu turun
6. Kesalahan keadaan tunak tidak mengalami perubahan yang berarti [14].

Kendali *derivative* biasa di jumpai pada kombinasi dengan elemen kendali lainnya, umumnya dikombinasikan dengan kendali proporsional



(a)



(b)

Gambar 2.16 Respon Sistem (a) Tanpa Pengendali, (b) Pengendali PD [14]

Maka dapat disimpulkan pengendali PD suatu pengendali konvensional yang merupakan gabungan dari pengendali *Propotional* dan *Derivative*. Dimana Persamaan sebagai berikut

$$m(t) = K_p e(t) + K_p T_d \frac{de(t)}{dt} + \frac{K_p}{T_i} \int_0^t e(t) \quad (2.29)$$

$$m(t) = K_p e(t) + K_D \frac{de(t)}{dt} + K_I \int_0^t e(t) \quad (2.30)$$

Dengan fungsi alih sebagai berikut :

$$\frac{M(s)}{E(s)} = K_p + \frac{K_I}{s} + K_D s \quad (2.31)$$

Pengabungan 2 pengendali ini dapat melengkapi satu lain. Pengendali tersebut memiliki kelebihan dan kekurangan masing. Efek dari masing pengendali adalah sebagai berikut.

Tabel 2.2 Tanggapan Sistem Kendali PD Terhadap Perubahan Parameter [7]

	<i>Rise Time</i>	<i>Overshoot</i>	<i>Settling Time</i>	<i>Error Stady State</i>
<i>Propotional</i>	Menurunkan	Meningkatkan	Perubahan Sedikit	Menurunkan
<i>Derivative</i>	Perubahan Sedikit	Menurunkan	Menurunkan	Perubahan Sedikit

Setiap kekurangan dan kelebihan dari masing masing pengendali P dan D dapat saling menutupi dengan menggabungkan keduanya secara paralel menjadi pengendali *proportional plus derivative* (pengendali PD). Elemen-elemen pengendali P dan D masing masing secara keseluruhan bertujuan untuk mempercepat reaksi sebuah sistem, menghilangkan *offset* dan menghasilkan perubahan awal yang besar. Karakteristik pengendali PD sangat dipengaruhi oleh kontribusi besar dari ketiga parameter P dan D. Penyetelan konstanta K_p dan T_d akan mengakibatkan penonjolan sifat dari masing-masing elemen. Satu atau dua dari ketiga konstanta tersebut dapat disetel lebih menonjol dibanding yang lain. Konstanta yang menonjol itulah akan memberikan kontribusi pengaruh pada respon sistem secara keseluruhan [7].

2.2.6 Metode Heuristik

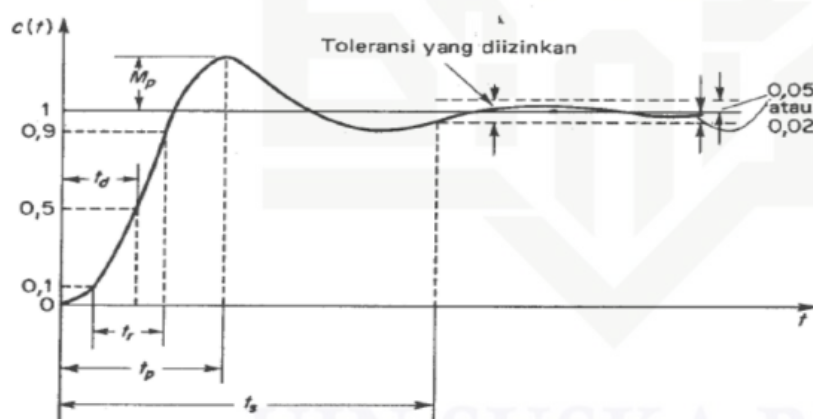


Sebuah metode pemecahan masalah menggunakan eksplorasi dan cara coba-coba.

Heuristic adalah suatu aturan atau metode untuk bisa menyelesaikan solusi secara penalaan. Rancangan metode *Heuristic* ini diperoleh dengan cara perubahan parameter yang disesuaikan dengan kinerja plant yang akan dikendalikan. Untuk perancangan sistem pengendalian PD dilakukan pencarian nilai besarnya K_p dan T_d . Maka pengujian dilakukan dalam beberapa tahap, dengan penalaan (*Heuristic Method*) dimana penalaan parameter pengendali dimulai dengan hanya menggunakan pengendali P kemudian baru ditambahkan dengan pengendali D. Pemberian nilai parameter disesuaikan dengan karakteristik respon sistem yang diperoleh [15].

2.2.7 Analisa Respon Transien

Metode identifikasi dilakukan dengan pendekatan grafis, di mana sinyal uji diberikan pada sistem untuk mengetahui respon *open loop* sistem. Dari respon sistem, dapat diketahui karakteristik-karakteristik penting dari sistem. Identifikasi sistem dengan metode ini bekerja berdasarkan pengamatan grafis terhadap masukan step. Pemodelan sistem yang digunakan adalah pemodelan orde satu. Karakteristik respon waktu untuk sistem orde satu diberikan berdasarkan respon sistem terhadap masukan sinyal step. Karakteristik respon transien sistem orde satu terdiri dari spesifikasi teoritis dan spesifikasi praktis. Spesifikasi teoritis konstanta waktu (τ), sedangkan untuk spesifikasi praktis adalah *settling time*, *rise time*, *delay time* dan *error steady state*.



Gambar 2.17 Karakteristik Respon Orde Dua [15]

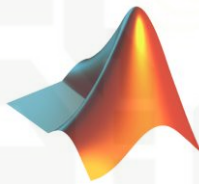
Identifikasi sistem merupakan cara untuk memperoleh nilai Konstanta waktu (τ), Waktu tunak (t_s), Waktu naik (t_r), Waktu tunda (t_d), *Error Steady State* (e_{ss}) [15]



1. Konstanta Waktu (τ) adalah waktu yang dibutuhkan sistem untuk naik sebesar 63.2 % dari *Output Steady state*
2. Waktu tunak / *settling point*(t_s) adalah waktu yang menunjukkan bahwa sistem telah memasuki daerah stabil.
3. Waktu naik / *rise time*(t_r) adalah waktu yang menunjukkan system telah naik 5% - 95% dan 10 % - 90% dari *output steady state*
4. Waktu tunda / *delay time*(t_d) adalah waktu yang dibutuhkan oleh respon mulai dari $t = 0$ sampai respon mencapai 50 % dari *output steady state*
5. *Error steady state* (e_{ss}) adalah besarnya nilai kesalahan yang terjadi pada *output steady state*

2.2.8 MATLAB

MATLAB (*Matrix Laboratory*) merupakan salah satu *software* yang dapat digunakan untuk menganalisa, komputasi data numerik, untuk mensimulasikan suatu sistem dengan pemodelan matematis . MATLAB menggunakan bahasa pemrograman matematika lanjutan yang mengaplikasikan sifat serta bentuk matrik. MATLAB merupakan *software* yang hadir dengan fungsi dan karakteristik yang berbeda dengan bahasa pemrograman lain yang sudah ada lebih dahulu seperti *Delphi*, *Basic* maupun C++.

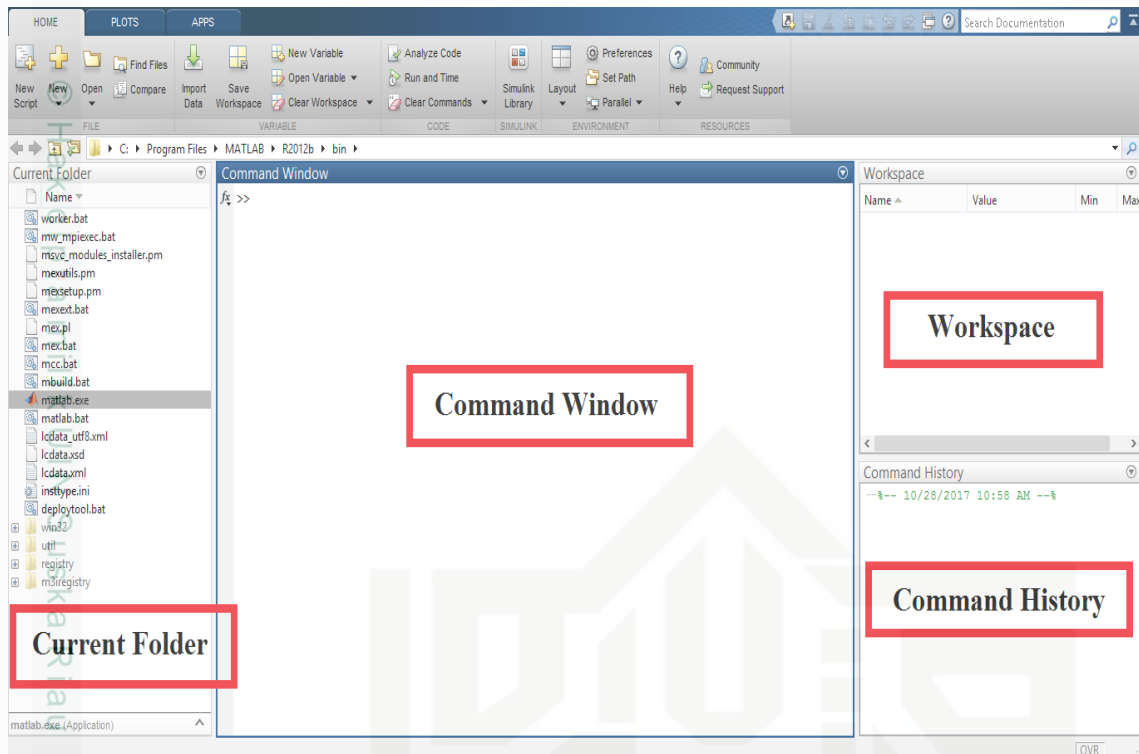


Gambar 2.18 Ikon MATLAB

MATLAB merupakan *software* yang pertama kali dikenalkan oleh *University of New Mexico* dan *University of Stanford* pada tahun 1970. *Software* ini pertama kali memang digunakan untuk keperluan analisis numerik, aljabar linier dan teori tentang matriks. Saat ini, kemampuan dan fitur yang dimiliki oleh Matlab sudah jauh lebih lengkap dengan ditambahkannya *toolbox-toolbox* yang sangat luar biasa. Ada beberapa versi MATLAB yang dapat digunakan

Window MATLAB atau tampilan jendela MATLAB terdiri dari beberapa bagian sebagai berikut

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber:
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar UIN Suska Riau.
2. Dilarang mengumpulkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin UIN Suska Riau.



Gambar 2.19 Bagian Window MATLAB

1. Command Window

Command Window merupakan tampilan utama *window* MATLAB. *Command Window* merupakan tempat untuk mengoperasikan baris-baris program secara langsung. *Command Window* merupakan tempat untuk menjalankan fungsi, mendeklarasikan variabel serta menjalankan proses-proses yang ingin dilakukan

2. Current Folder

Current Folder merupakan *window* yang menampilkan isi dari *folder/* direktori kerja saat menggunakan MATLAB. *User* dapat mengganti direktori sesuai dengan tempat yang diinginkan. *Default* dari alamat direktori berada dalam *folder works* tempat *program files* MATLAB berada.

3. Workspace

Workspace merupakan tempat untuk menampilkan semua variabel-variabel yang sedang aktif saat pemakaian MATLAB. Apabila variabel berupa data matriks berukuran besar maka *user* dapat melihat data secara keseluruhan dengan *double* klik pada variabel. MATLAB secara otomatis akan menampilkan *window* “*array editor*” yang berisikan data variabel yang *user* inginkan.

4. Command History



Command History merupakan *window* yang berfungsi menyimpan *history* atau perintah-perintah yang sebelumnya dilakukan oleh *user* MATLAB. Sehingga saat kita ingin menggunakan perintah yang sama kita dapat melihat perintah tersebut pada *command history*.

Hak Cipta Dilindungi Undang-Undang

Hak Cipta milik UIN Suska Riau

State Islamic University of Sultan Syarif Kasim Riau

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber:
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar UIN Suska Riau.
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin UIN Suska Riau.

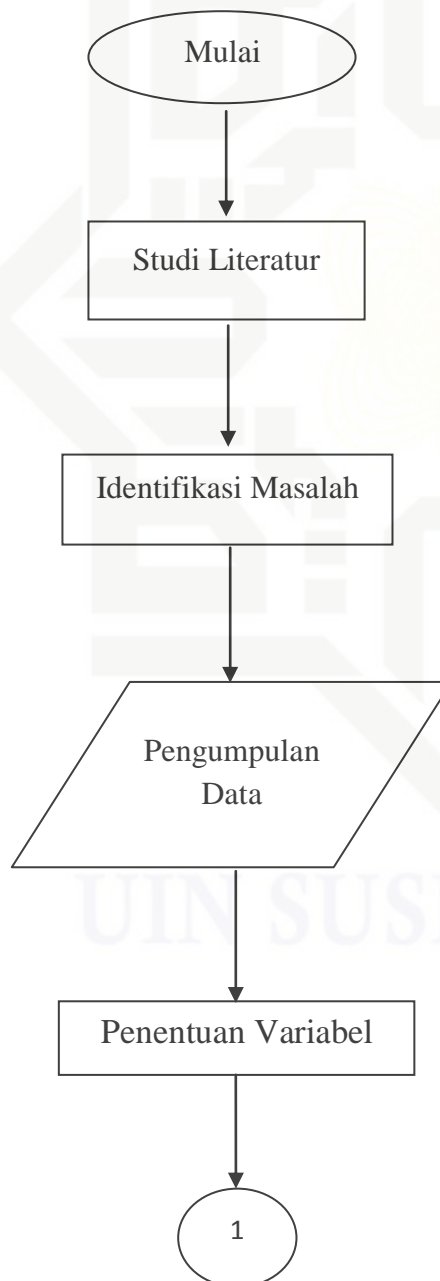


BAB III

METODOLOGI PENELITIAN

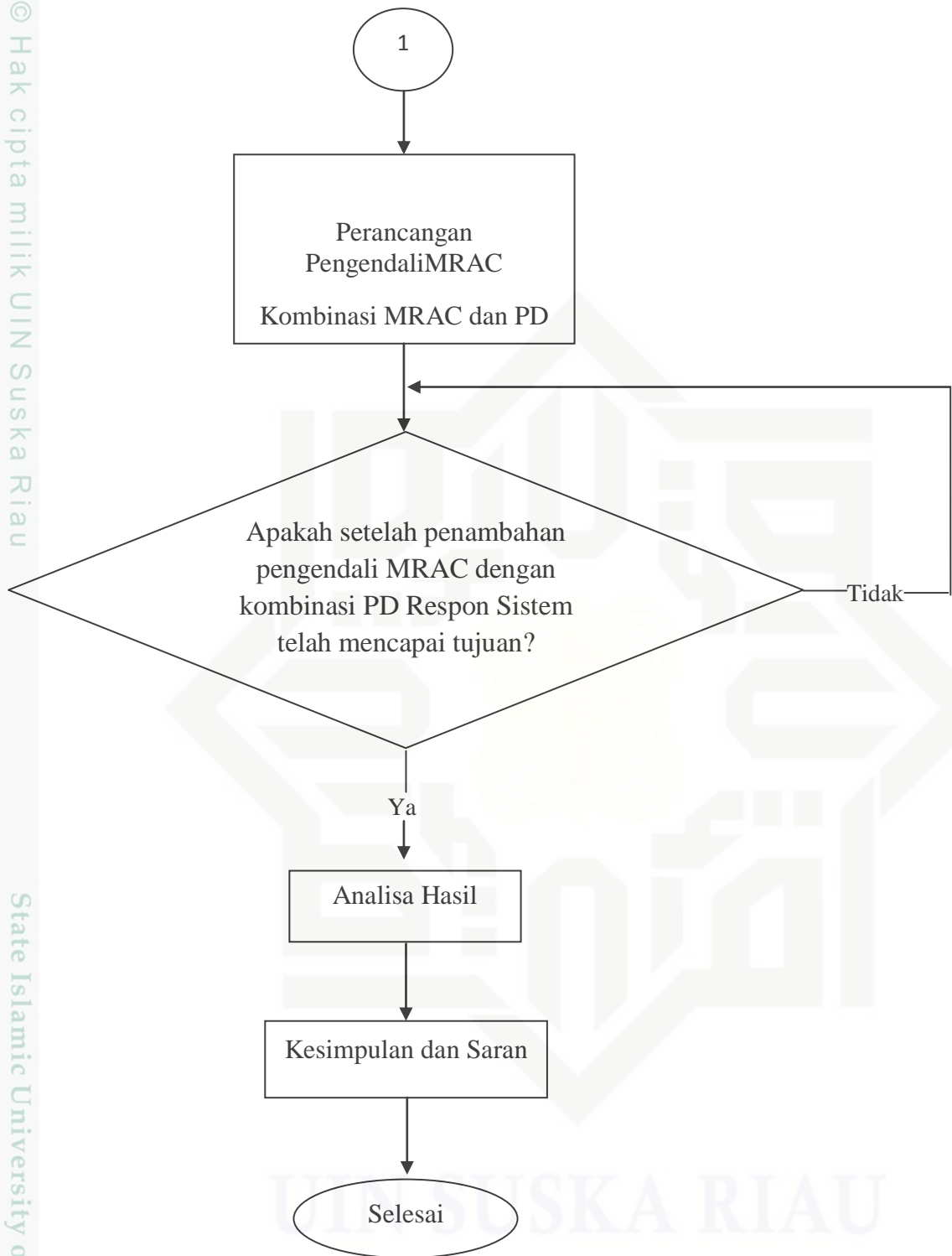
Pada BAB ini akan di jabarkan mengenai alur dan tahapan penelitian. Alur penelitian dimulai dengan studi literature, penentuan variabel berupa bentuk fungsi alih dari sistem *Ball and Beam* ini, validasi model matematis, merancang pengendali *Model Reference Adaptive Control* (MRAC) di kombinasikan dengan PD pada sistem *Ball and Beam*, lalu menganalisa hasil dari rancangan pengendali dan terakhir menarik kesimpulan dari hasil penelitian.

3.1 Proses Alur Penelitian



Hak Cipta Dilindungi Undang-Undang

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber:
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar UIN Suska Riau.
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin UIN Suska Riau.



Gambar 3.1 *Flow Chart* Penelitian



3.2 Tahapan Penelitian

Dalam melakukan penelitian, sebelumnya terlebih dahulu dilakukan perancaan penelitian yang meliputi identifikasi masalah, perumusan masalah, penentuan judul, melakukan simulasi *plant* sampai dengan tujuan yang diinginkan dalam melakukan penelitian. Agar penelitian yang dilakukan dapat mencapai tujuan yang diinginkan, ada beberapa tahapan yang harus dilakukan sebagai berikut :

1. Identifikasi Masalah

Sebelum melakukan penelitian, terlebih dahulu dilakukan identifikasi masalah dimana disini untuk mencari masalah apa yang akan diangkat dalam penelitian Tugas Akhir. Masalah yang akan diangkat dalam penelitian Tugas Akhir ini adalah mempercepat respon pada Sistem *Ball and Beam*.

2. Studi Literatur

Setelah mendapatkan masalah yang akan diangkat dalam Tugas Akhir, tahapan selanjutnya yaitu studi literatur. Dimana dalam studi literatur, mencari dan mempelajari penelitian terkait dari beberapa referensi baik dari buku, jurnal atau *paper*, maupun dari Tugas Akhir. Adapun hal yang perlu di pelajari adalah pemodelan matematis *Ball and Beam*, pengendali MRAC serta pengendali PD.

3. Pengumpulan Data

Dari beberapa penelitian terkait yang telah didapatkan, maka langkah selanjutnya yaitu pengumpulan data-data yang berhubungan dengan penelitian mulai dari penentuan *set point* untuk respon *Ball and Beam* yaitu sebesar 1 derajat serta ketetapan *transfer function* pada sistem orde dua yaitu:

$$TF = \frac{c}{s^2 + sa + b}$$

Dengan:

$$a = 0; b = 0; c = 0,7$$

4. Penentuan Variabel

Setelah didapatkan nilai dari masing masing variabel pada tahap pengumpulan data, maka selanjutnya variabel tersebut di substitusikan ke dalam pemodelan matematis sistem.

$$TF = \frac{0.7}{s^2} \quad (3.1)$$



5. Validasi Model Matematis

Validasi model matematis dilakukan dengan cara mensimulasikan persamaan 2.8 secara *open loop* menggunakan *Simulink* MATLAB, lalu langkah selanjutnya yaitu menyesuaikan respon sistem dari hasil simulasi dengan respon sistem yang dihasilkan dari penelitian terkait sebelumnya. Selanjutnya menganalisa performansi respon sistem.

6. Perancangan Pengendali

Pengendali yang digunakan dalam penelitian Tugas Akhir ini adalah MRAC, PD dan kombinasi MRAC-PD. Untuk merancang pengendali adaptif MRAC terlebih dahulu dilakukan penurunan matematis pengendali MRAC menggunakan metode MIT-Rule. Selanjutnya melakukan perancangan pengendali PD dengan menggunakan metode heuristik dan mengkombinasikan pengendali MRAC dengan pengendali PD.

7. Analisa Hasil

Analisa hasil dilakukan dengan melihat apakah respon keluaran sistem yang meliputi *rise time*, *Settling Time*, serta *error steady state* dari perancangan pengendali apakah respon sistem sudah sesuai dengan tujuan yang diharapkan, lalu apabila respon sistem yang dihasilkan belum sesuai dengan yang diharapkan maka dilakukan pemeriksaan kembali pada perancangan pengendali.

8. Kesimpulan dan Saran

Setelah dilakukan analisa hasil dan sesuai dengan tujuan maka penelitian yang dilakukan berhasil dan dapat ditarik kesimpulan dari hasil penelitian. Serta memberikan saran yang berguna untuk dijadikan referensi penelitian Sistem *Ball and Beam* selanjutnya.

Tahapan Penelitian

3.3 Pengumpulan Data

Pengumpulan data dilakukan dengan mencari beberapa penelitian terkait guna untuk memperoleh *set point* 1 derajat dari sistem dan mencari beberapa variabel yang diperlukan dalam pemodelan matematis sistem.

3.4 Validasi Model Matematis

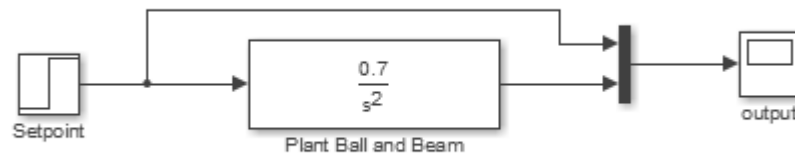
Validasi model matematis untuk sistem *Ball and Beam* dilakukan dengan mensimulasi persamaan 2.8 secara *open loop* tanpa pengendali untuk mengetahui perilaku dan karakteristik dari sistem sebelum dirancang pengendali.

Hak Cipta Dilindungi Undang-Undang

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber:

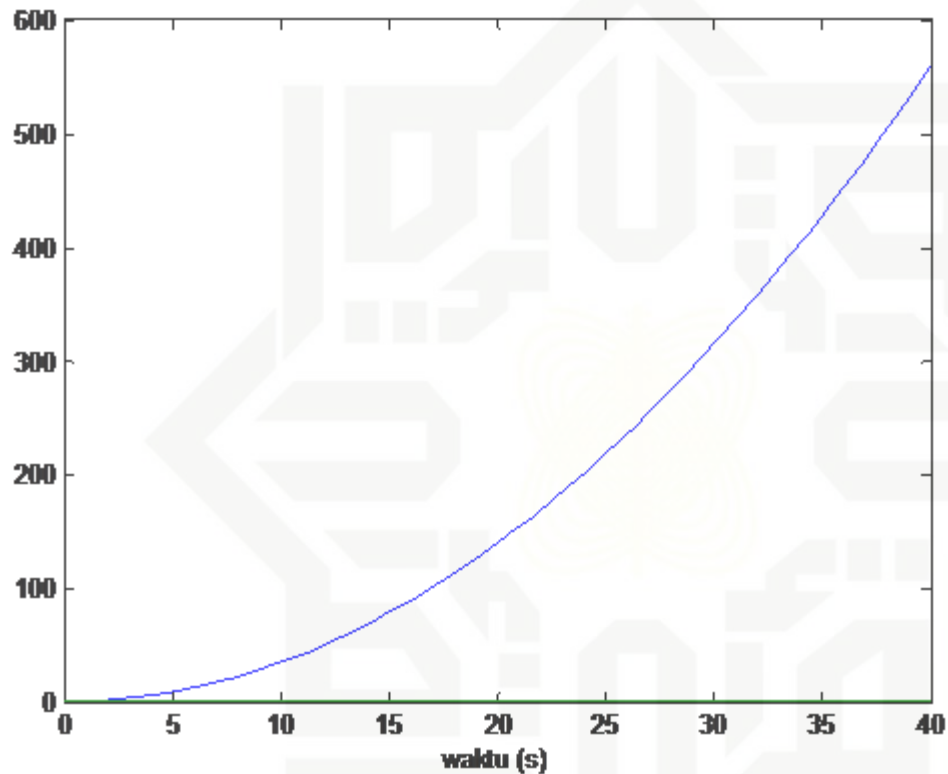
- Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
- Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar UIN Suska Riau.

2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin UIN Suska Riau.



Gambar 3.2 Diagram Blok Sistem *Ball and Beam*

Maka didapatkanlah grafik pemodelan sistem *Ball and Beam* pada gambar 3.3.



Gambar 3.3 Grafik Respon Sistem *Ball and Beam*

Dari gambar 3.3 didapatkan hasil respon dari sistem *Ball and Beam* secara *open loop* tanpa menggunakan pengendali yang disimulasikan menggunakan *matlab R2013a* dan pada hasil respon keluaran sistem *Ball and Beam* menunjukkan grafik yg sama sesuai dengan rujukan. Masih terlihat bahwa hasil respon sistem pada saat diberikan input sebesar 1 derajat, sistem tidak stabil dan masih terdapat *error* yang cukup besar. Sehingga berdasarkan hasil pengujian dari sistem *Ball and Beam* ini perlu dipasang pengendali yg mampu menghilangkan *error*, mempercepat respon sistem dan menstabilkan sistem tersebut.



3.5 Perancangan Pengendali MRAC

3.5.1 Alur Perancangan Pengendali MRAC

1. Menentukan Model Matematis Sistem (*plant*)
Karakteristik dari sistem harus dipastikan, apakah sistem termasuk dalam sistem orde satu atau orde dua. Sistem yang digunakan pada penelitian ini merupakan sistem orde dua.
2. Membuat Model Referensi
Jika sistem yang akan dikendalikan merupakan sistem orde dua maka model referensi yang dibuat juga harus sesuai karakteristik sistem orde dua.
3. Perancangan Pengendali MRAC
Setelah membuat model referensi langkah selanjutnya yaitu merancang pengendali MRAC. Perancangan pengendali MRAC menggunakan metode *MIT Rule* yang merujuk pada buku dan jurnal-jurnal penelitian dengan 2 *gain*.
4. Setelah selesai perancangan pengendali MRAC selanjutnya menentukan nilai masing-masing *gain* untuk mendapatkan hasil respons yang diinginkan. Metode yang digunakan untuk menentukan nilai *gain* yaitu metode Heuristik. Metode Heuristik merupakan sebuah metode pemecahan masalah menggunakan eksplorasi dan cara coba-coba. Heuristik adalah suatu aturan atau metode untuk bisa menyelesaikan solusi secara penalaran. Rancangan metode Heuristik ini diperoleh dengan cara perubahan parameter yang disesuaikan dengan kinerja *plant* yang akan dikendalikan [20]. Adapun alur penentuan nilai *gain* pada MRAC sebagai berikut:
 - a. Dimulai dengan memberi nilai *gain* 0. Perhatikan respon sistem apakah sudah menyerupai model atau tidak.
 - b. Jika tidak atau tidak ada respon dari sistem, beri nilai *gain* 10^{-10} . Jika belum ada perubahan naikkan nilai *gain* menjadi, 10^{-9} , 10^{-8} , 10^{-7} , ... 10^{-1} sampai terjadi perubahan pada respon sistem.
 - c. Jika perubahan respon semakin mendekati model, lanjutkan penaikan nilai *gain* sampai respon sistem persis seperti model. Jika perubahan respon semakin menjauhi model, ubah nilai *gain* menjadi negatif (-10^{-7}) dan lanjutkan penaikan nilai *gain* sampai respon sistem persis seperti model.



- d. Pilih nilai *gain* adaptasi yang kecil menghasilkan respon *plant* yang lambat dalam mengikuti model referensinya, sebaliknya nilai *gain* adaptasi yang besar menghasilkan respon system berosilasi [7].

3.5.2 Membuat Model Referensi

Plant yang digunakan merupakan sistem orde dua maka model referensi yang digunakan mengikuti persamaan karakteristik orde dua. Pembuatan model mengikuti persamaan.

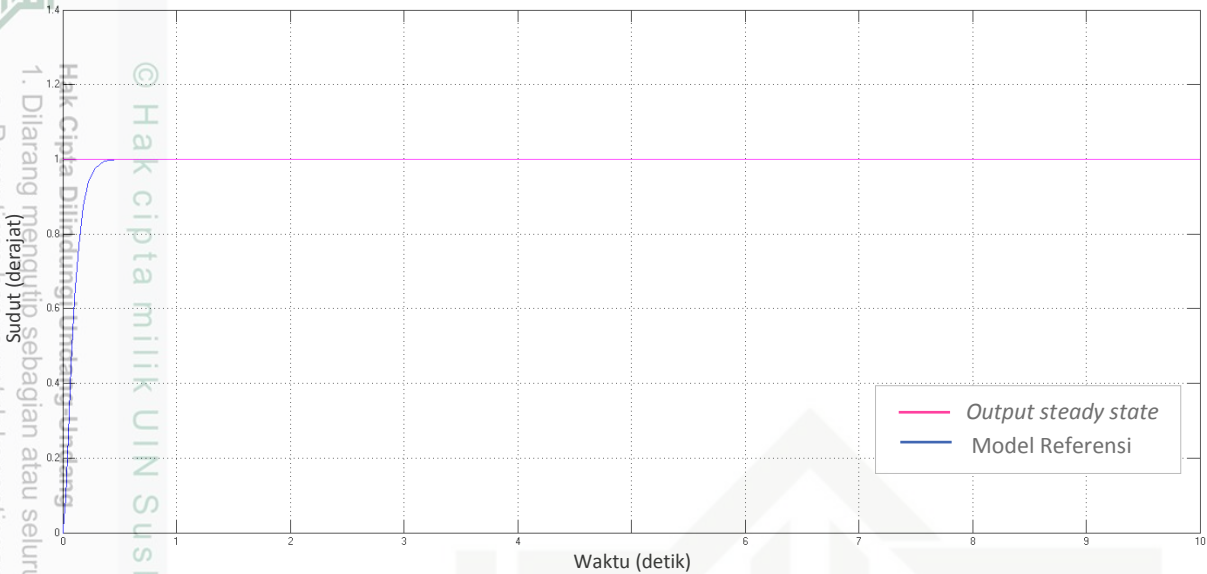
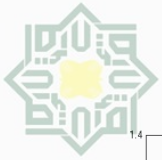
$$G_m(s) = \frac{\omega_n^2}{s^2 + 2\zeta\omega_n s + \omega_n^2} \quad (3.2)$$

Perancangan model referensi untuk *Ball and Beam* yaitu dengan memberi nilai $\zeta = 1$ agar respons yang akan diperoleh *Criticaldamp*, dan nilai respon percepatan waktu untuk *output steady state* yang diinginkan adalah 0,2 detik ($t = 0,2$), sehingga dapat diperoleh nilai frekuensi alami 20 ($\omega_n = 20$) berdasarkan persamaan sistem orde 2 kriteria 2% untuk nilai *settling time* sebagai berikut:

Substitusikan nilai $\zeta = 1$, dan $\omega_n = 20$ ke persamaan

$$\begin{aligned} G_m(s) &= \frac{\omega_n^2}{s^2 + 2\zeta\omega_n s + \omega_n^2} \\ G_m(s) &= \frac{(20)^2}{s^2 + 2(1)(20)s + (20)^2} \\ G_m(s) &= \frac{400}{s^2 + 40s + 400} \end{aligned} \quad (3.3)$$

Maka grafik dari model referensi untuk *Ball and Beam* yang diperoleh sebagai berikut:



Gambar 3.4 Grafik Model Referensi *Ball and Beam*

3.5.3 Perancangan Pengendali MRAC

Dengan nilai fungsi alih model referensi berdasarkan skema MRAC pada gambar 2. $8b_m/s^2 + a_{1m}s + a_{0m}$. Selanjutnya adalah nilai filter (θ_1) dan (θ_2) dibuat menyerupai fungsi alih model referensi, karena filter harus menyaring keluaran y_{plant} agar mengikuti keluaran model referensi dimana persamaan filter menjadi :

$$(\theta_1), (\theta_2) = \frac{a_{0m}}{s^2 + a_{1m}s + a_{0m}} \quad (3.4)$$

Setelah disubstitusikan persamaan 3.3 dan 3.4 sehingga filter yang digunakan sistem menjadi :

$$(\theta_1), (\theta_2) = \frac{400}{s^2 + 40s + 400} \quad (3.5)$$

Penjabaran persamaan matematis perancangan MRAC pada sistem ball and beam dengan mensubstitusikan persamaan 3.4 ke dalam persamaan 2.25 dan 2.26

$$\frac{d\theta_1}{dt} = -\gamma \frac{\delta e}{\delta \theta_1} e = -\gamma \left(\frac{400}{s^2 + 40s + 400} u_c \right) e \quad (3.6)$$



$$\frac{d\theta_2}{dt} = -\gamma \frac{\delta e}{\delta \theta_2} e = \gamma \left(\frac{400}{s^2 + 40s + 400} u_c \right) e \quad (3.7)$$

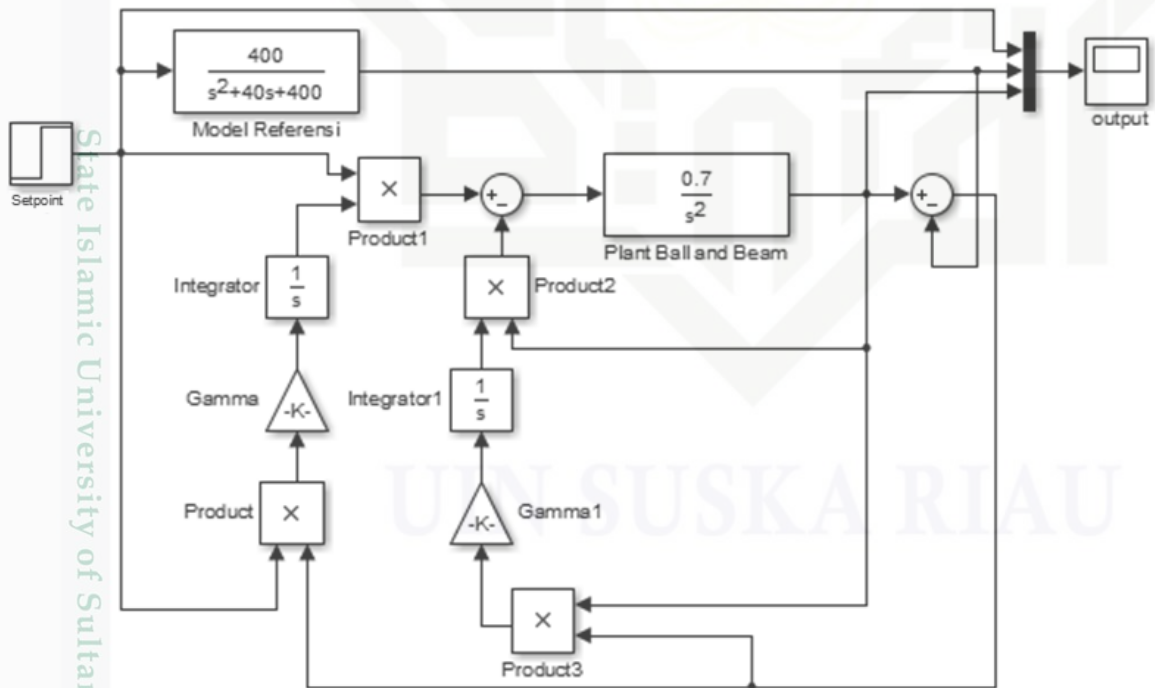
Setelah mendapatkan nilai filter persamaan diatas disubstitusikan kedalam persamaan 2.18 sehingga menjadi :

$$y_{plant} = G_p u = \left(\frac{b}{s^2 + a_1 s + a_0} \right) (\theta_1 u_c - \theta_3 y_{plant})$$

$$y_{plant} = \left(\frac{b}{s^2 + a_1 s + a_0} \right) \left(-\gamma \left(\frac{a_{0m}}{s^2 + a_{1m} s + a_{0m}} u_c \right) e - \gamma \left(\frac{a_{0m}}{s^2 + a_{1m} s + a_{0m}} y_{plant} \right) e \right)$$

$$y_{plant} = \left(\frac{0.7}{s^2} \right) \left(-\gamma \left(\frac{400}{s^2 + 40s + 400} u_c \right) e - \gamma \left(\frac{400}{s^2 + 40s + 400} y_{plant} \right) e \right)$$

Berdasarkan skema pada Gambar 2.8 dan persamaan matematis yang sudah diturunkan diatas, maka desain MRAC pada perangkat lunak matlab pada system ball and beam didapatkan skemasebagai berikut :

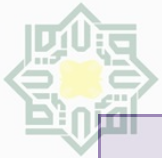


Gambar 3.5 Skema MRAC dengan Metode MIT Rule[17]

Berdasarkan blok-blok *simulink* yang sudah dirancang, maka selanjutnya dilakukan *tuning* untuk menentukan nilai *gain* yang tepat. Metode yang digunakan untuk menentukan nilai *gain* yaitu metode Heuristik. Metode Heuristik merupakan sebuah metode pemecahan masalah menggunakan eksplorasi dan cara coba-coba. Heuristik adalah suatu aturan atau metode untuk bisa menyelesaikan solusi secara penalaan. Rancangan metode Heuristik ini diperoleh dengan cara perubahan parameter yang disesuaikan dengan kinerja *plant* yang akan dikendalikan. Hasil dari *tuning* nilai *gain* ditunjukkan tabel berikut:

Tabel 3.1 Hasil *Tunning* Nilai *Gamma*

Gain		Respon Waktu			
y_1	y_2	t_s	t_r	E	M_p
0	0	-	-	-	-
1	0	-	-	-	-
2	0	-	-	-	-
2	1	-	-	-	-
3	1	-	-	-	-
3	3	-	-	-	-
-10	3	0.359	0.1737	-0.0008	29.34
-10	10	0.359	0.1723	-0.0014	0.54
-20	15	0.3115	0.1491	-0.0006	21.45
-40	30	0.2751	0.132	-0.0002	13.01
-70	50	0.2549	0.1225	0	7.31
-80	55	0.2512	0.1207	0.0001	5.71
-100	63	0.2464	0.1184	0.0002	4.01

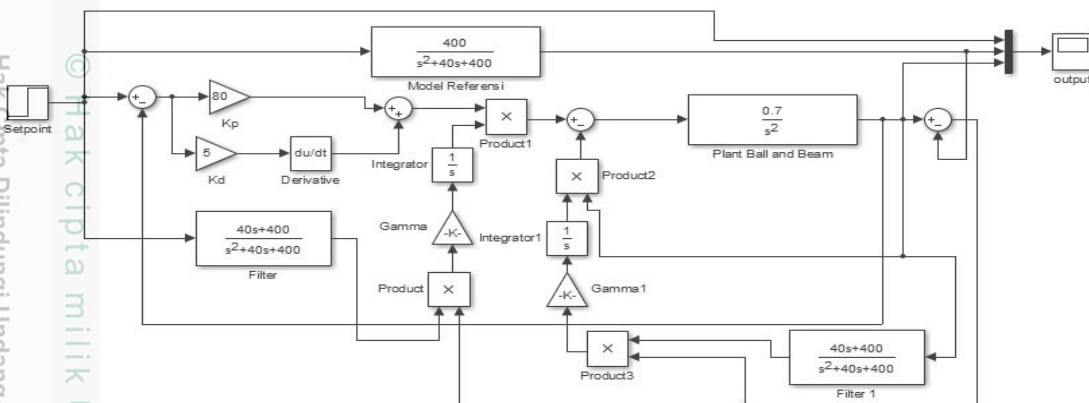


-120	70	0.2429	0.117	0.0001	2.83
-180	90	0.2456	0.1153	0.0001	0.66
-200	100	0.247	0.1161	0.0001	0.3
-220	115	0.2512	0.117	0	0.13
-250	130	0.2516	0.117	0.0003	0.06
-270	145	0.253	0.117	0.0002	0.08
-300	150	0.2586	0.117	0	0
-320	180	0.2599	0.1172	0	0.08
-350	200	0.262	0.1182	0.0003	0.07

Pada tabel 3.1 untuk hasil *tunning* nilai *gamma* dengan menggunakan 2 *gamma* di mulai dari nilai *gamma* 1= 0 dan nilai *gamma*2 =0 namun respon waktu tidak menunjukkan hasil hingga nilai *gamma*1 dan *gamma* 2 mencapai 3, lalu kemudian *tunning* di lanjutkan dengan nilai *gamma*1 -10 dan nilai *gamma*2 3 yang menghasilkan overshoot sebesar 29.34%. proses *tunning* ini kembali di lanjutkan hingga nilai *gamma*1 -100 dan nilai *gamma*2 63, overshoot menurun dengan nilai 4.01%. pada nilai *gamma*1 -220 dan nilai *gamma*2 115 didapatkan hasil error 0 derajat namun masih terdapat overshoot sebesar 0.13%. Dan didapatkanlah nilai *gamma*1 -300 dan nilai *gamma*2 150 yang hasilkan nilai overshoot 0% dan nilai error 0 derajat.

3.5.4 Perancangan Pengendali MRAC-PD

Respon yang dihasilkan dengan menggunakan MRAC masih terdapat kekurangan yaitu respon yang dihasilkan lambat mencapai set point dan masih tertinggal dari model referensinya, maka dikombinasikan dengan pengendali PD. Berikut blok diagram pengendali MRAC dengan kombinasi PD.



Gambar 3.6 Desain MRAC-PD pada Sistem *Ball and Beam*

Tabel 3.2 Hasil Tuning Parameter PD

Gamma	Parameter		Overshoot	Error
	Kp	Kd		
150-300	0	0	-	
	1	0	137.59	-0.6843
	3	0.01	125.61	-0.0891
	8	0.1	79.8	-0.0262
	10	0.4	28.82	-0.0002
	15	0.9	11.48	0
	35	1	35.93	-0.0006
	45	1.5	26.32	-0.0008
	50	1.8	21.5	-0.0003
	53	1.9	21.24	-0.0002
150-300	58	2	22.39	-0.0005
	60	2.4	15.28	-0.0006



Hak Cipta Dilindungi Undang-Undang

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber:
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar UIN Suska Riau.
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin UIN Suska Riau.

© Hak cipta milik UIN Suska Riau	62	2.8	9.65	-0.0004
	64	3	7.86	-0.0003
	68	3.5	3.8	-0.0003
	72	4	1.37	-0.0002
	75	4.7	0.08	0.0003
	80	5	0	0
	82	5.5	0.12	0.0003
	85	6	0.12	0.0006
	90	7	0.15	0.0008

Berdasarkan hasil tuning parameter PD pada tabel 4.2 didapatkan lah nilai overshoot terkecil 0% dengan nilai error 0 derajat. Hasil itu didapatkan dari nilai Kp 80 dan nilai Kd 5 dengan waktu simulasi 10 detik.

BAB V

KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan

Berdasarkan hasil simulasi dan analisa mengenai permasalahan pada keseimbangan sistem *Ball and Beam* dapat disimpulkan pengendali MRAC dengan nilai gamma (γ) pada nilai -300 dan 150 respon yang dihasilkan dapat mengurangi *overshoot*, namun masih adanya osilasi dan nilai t_s belum mampu mengikuti model referensinya. Sehingga dikombinasikan dengan pengendali PD dengan parameter Kp pada nilai 80 dan Kd pada nilai 5, respon keluaran yang sebelumnya berisolasi berhasil diredam, dengan nilai *settling time* 0.2586 detik, *rise time* 0.117 detik, *overshoot* 0 dan *error steady state* 0

5.2 Saran

Dari hasil penelitian yang dilakukan untuk pengembangan berikutnya dapat dilakukan penelitian mengkombinasikan pengendali MRAC dengan kendali cerdas seperti *fuzzy*, *adaptive fuzzy*, ataupun dengan pengendali lainnya.



DAFTAR PUSTAKA

- [11] Muslimm, W “ Perancangan pembuatan *plant ball and beam*” universitas dipenegoro.
- [12] Taifour Ali, A. Dkk. (2017)“*Design and Implementation of Ball and Beam Sistem Using PID Controller*”. *Automatic Control and Information Sciences*, Vol. 3, No. 1,1-4.
- [13] Kr Santosh, Choudhary (2014). “*Fractional Order Feedback Control of a Ball and Beam Sistem*” *World Academy of Science, Engineering and Technology International Journal of Computer, Electrical, Automation, Control and Information Engineering*.
- [14] Keshmiri, Mohammad Dkk (2012). “*Modeling And Control Of Ball And Beam Sistem Using Model Based And Non-Model Based Control Approaches*” *International Journal on smart sensing and inteligent sistem*. Canada.
- [15] Meenakshipriya. B, Kalpana. K (2014). “*modeling and control of ball and beam sistem using cooefficient diagram method (CDM) based controller*”. *Depertemen of mechattonics engineering*.Tanilnadu. India.
- [16] Ioannou. Petros and Fidan. Baris, *Adaptive Control Tutorial*, Siam, 2006.
- [17] Astrom K. Hagglund. ,*PID Controllers : Theory Design And Tuning*. Research Triangel Park, Instrument Society,1995.
- [18] Zuo. Xin, Liu. Jian-wei, Wang.Xin, and Liang. Hua-qing, *Adaptive PID and Model Reference Adaptive Control Switch Controller for Nonlinear Hydraulic Actuator*, Hindawi, 2017.
- [19] S. Teddy, I. Eka, A. Katjuk, *Disain dan Implementasi Kontrol PID Model Reference Adaptive Control untuk Automatic Safe Landing pada Pesawat UAV Quadcopter* ,InstitutTeknologiSepeluh November (ITS) Surabaya, 2012.
- [10] Refiana.Kartika, *Desain Kendali MRAC dengan Kombinasi PID untuk Mengendalikan Kecepatan pada Sistem Motor DC*, Universitas Islam Negeri Sultan Syarif Kasim, 2018.
- [11] Vernades.Rechy, *Desain Pengendali MRAC-PID Untuk Mengendalikan Posisi Pada Sistem Magnetic Levitation Ball*, Universitas Islam Negeri Sultan Syarif Kasim, 2018.



[12] Nguyen. Nhan T, *Model Reference Adaptive Control*, Springer International Publishing AG, 2017

[13] K. J. Astrom and B. Wittenmark, *Adaptive control*, 2nd ed., Dover Publications, New York. 1995

[14] Ali, Muhamad. 2004. *Pembelajaran Perancangan Sistem Kontrol PID Dengan Software MATLAB*. Universitas Negeri Yogyakarta

[15] Katsuhiko. Ogata, *Modern Control Engineering Fifth Edition*, Prentice Hall. New Jersey, 2010

[16] Garikayi, T. “ *Model Reference Adaptive Control System for Moistre Regulation in Cotton Ginning* ” .Harare Institue of Technologi. Zimbabwe. 2013.

[17] Sevcik, Keith. “*Model Reference Adaptive Control*“. Drexel University. Philadelphia. 2014.

Hak Cipta Dilindungi Undang-Undang

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber:

a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.

b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar UIN Suska Riau.

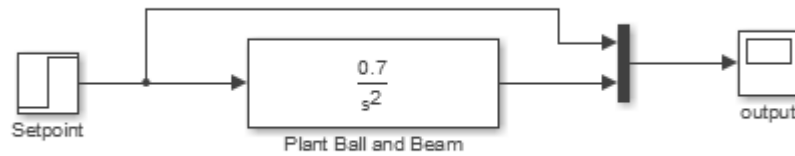
State Islamic University of Sultan Syarif Kasim Riau

UIN SUSKA RIAU

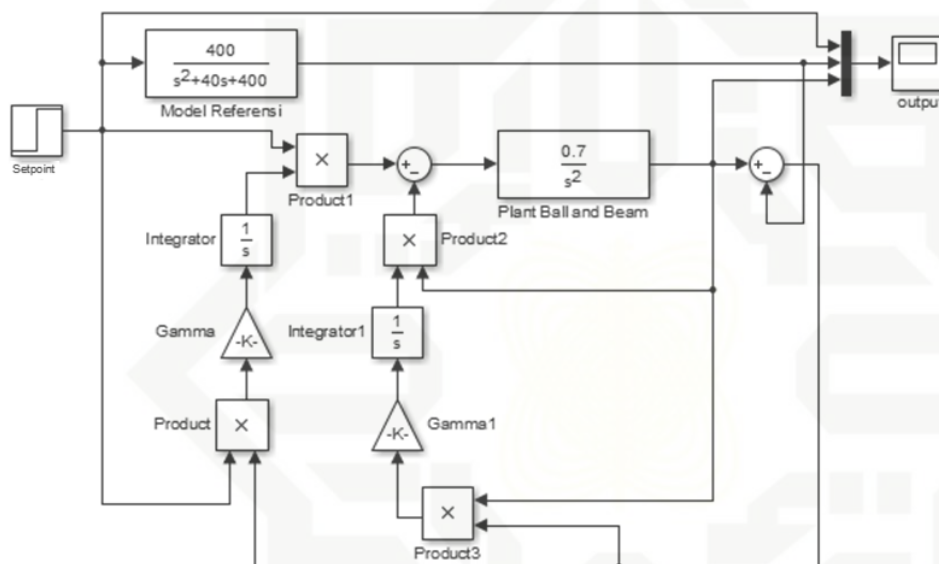
LAMPIRAN A

BLOK DIAGRAM SIMULINK

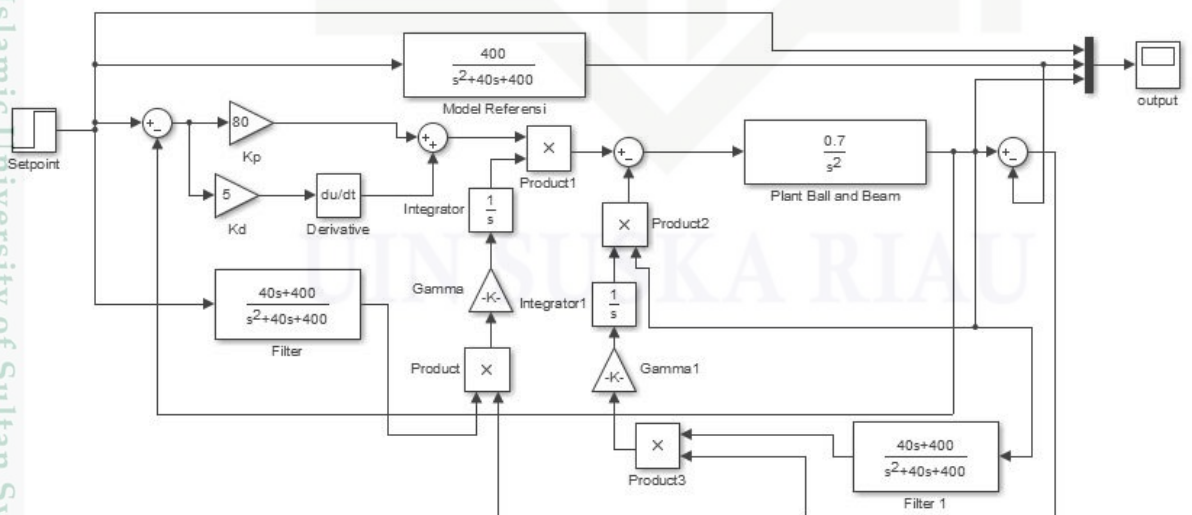
1. Blok diagram pemodelan matematis sistem *Ball and Beam*



2. Blok Diagram dengan Pengendali MRAC



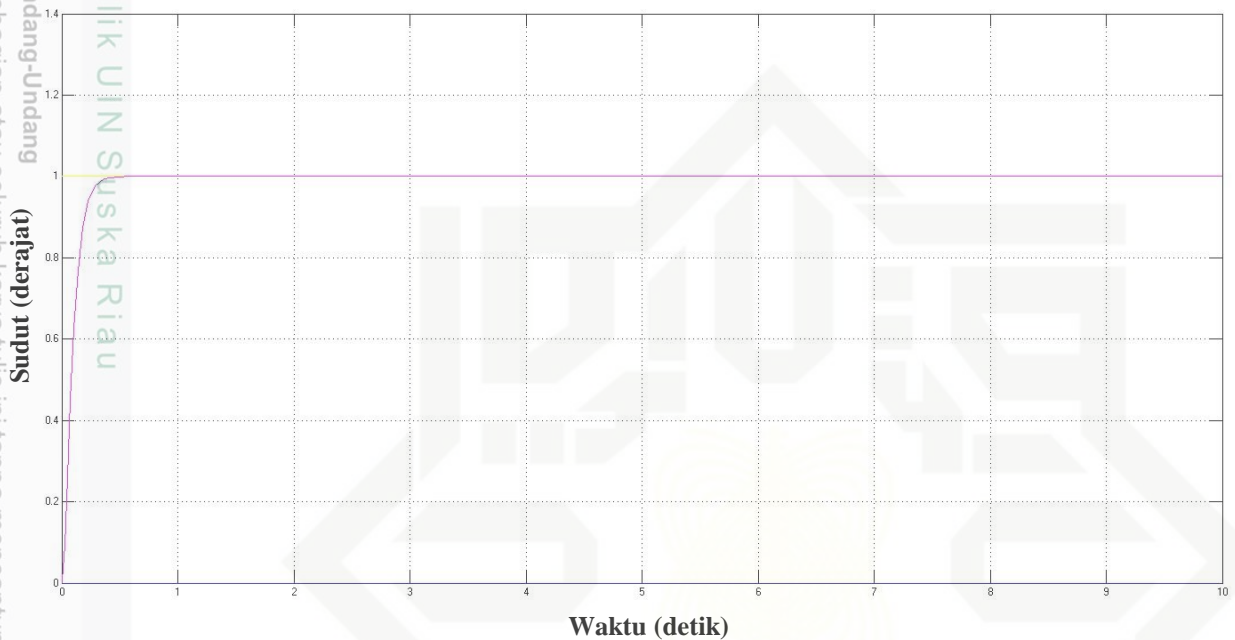
3. Blok Diagram dengan Pengendali MRAC-PD



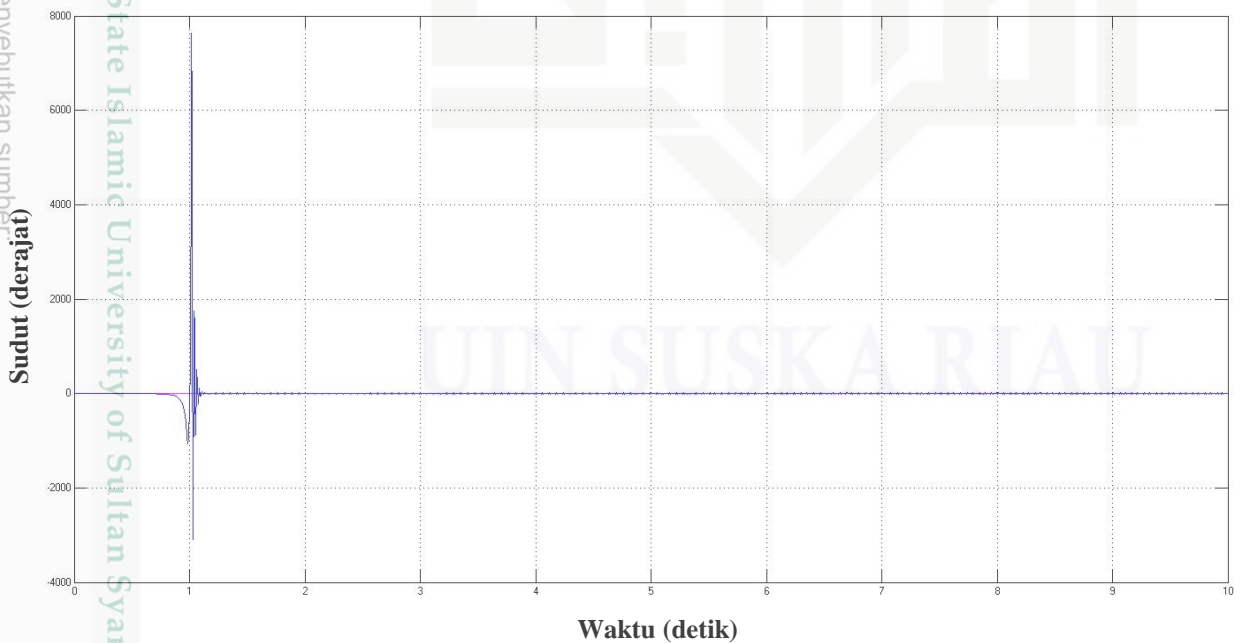
LAMPIRAN B

PROSES TUNING NILAI GAMMA(γ) PADA PENGENDALI MRAC DENGAN TRIAL AND ERROR PADA SISTEM *BALL AND BEAM*

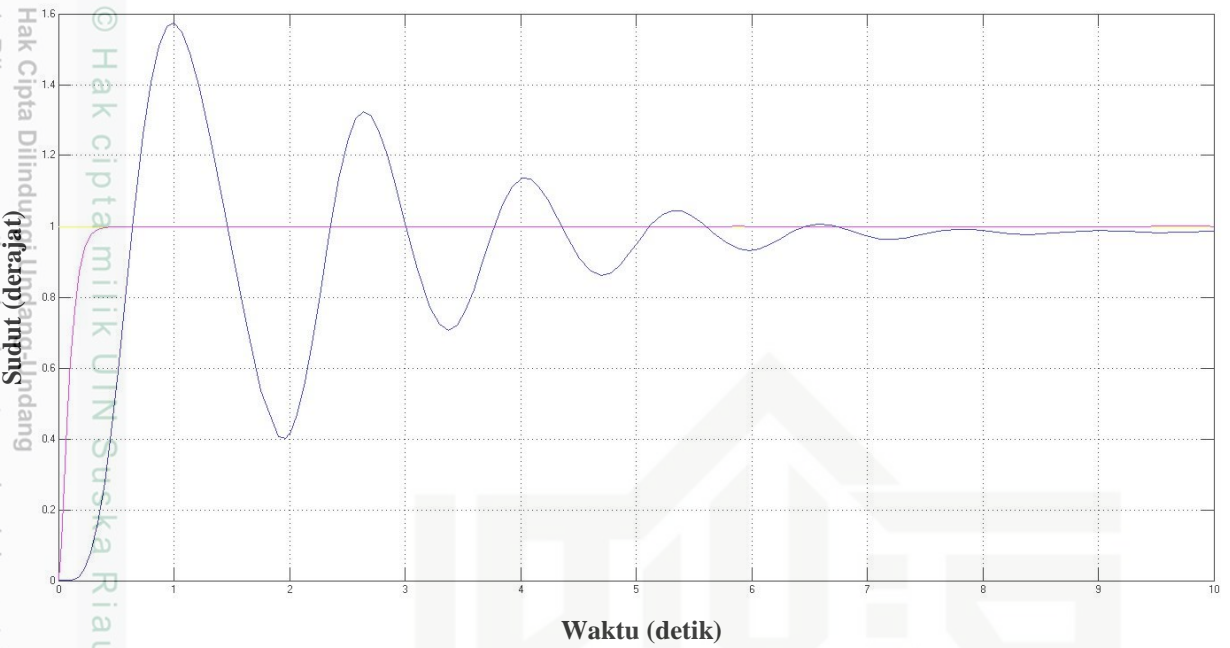
1. Hasil Simulasi MRAC dengan $\gamma_1 = 0, \gamma_2 = 0$



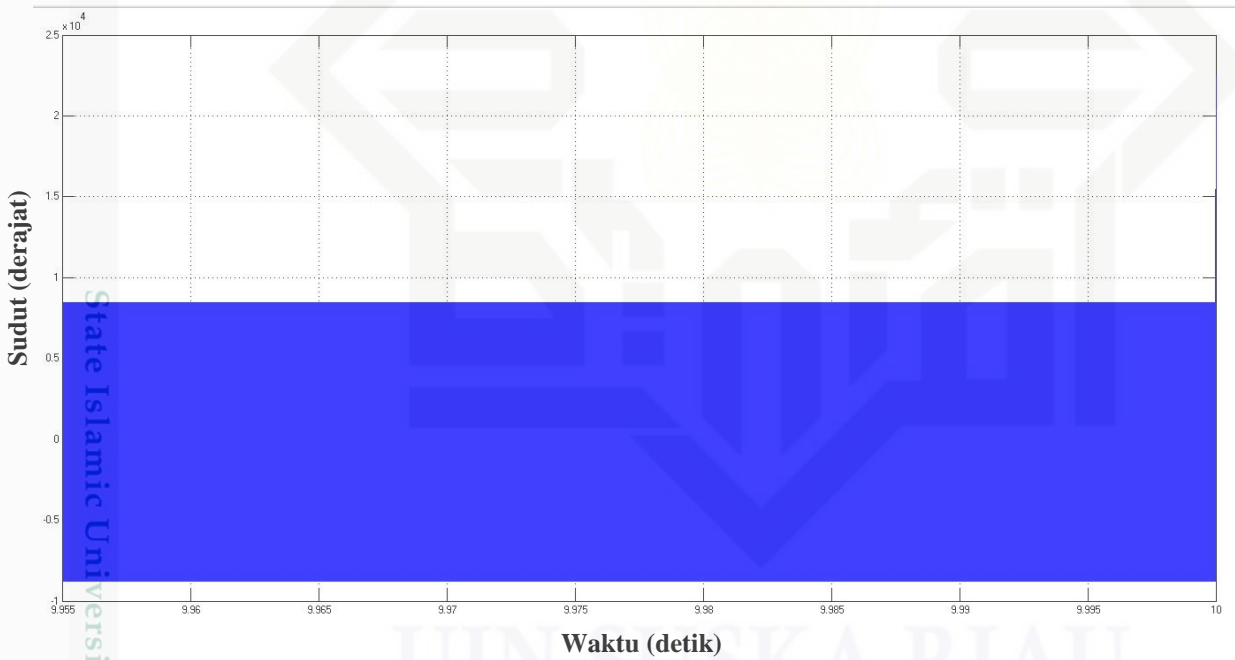
2. Hasil Simulasi MRAC dengan $\gamma_1 = 1, \gamma_2 = 1$



3. Hasil Simulasi MRAC dengan $\gamma_1 = -1, \gamma_2 = 3$



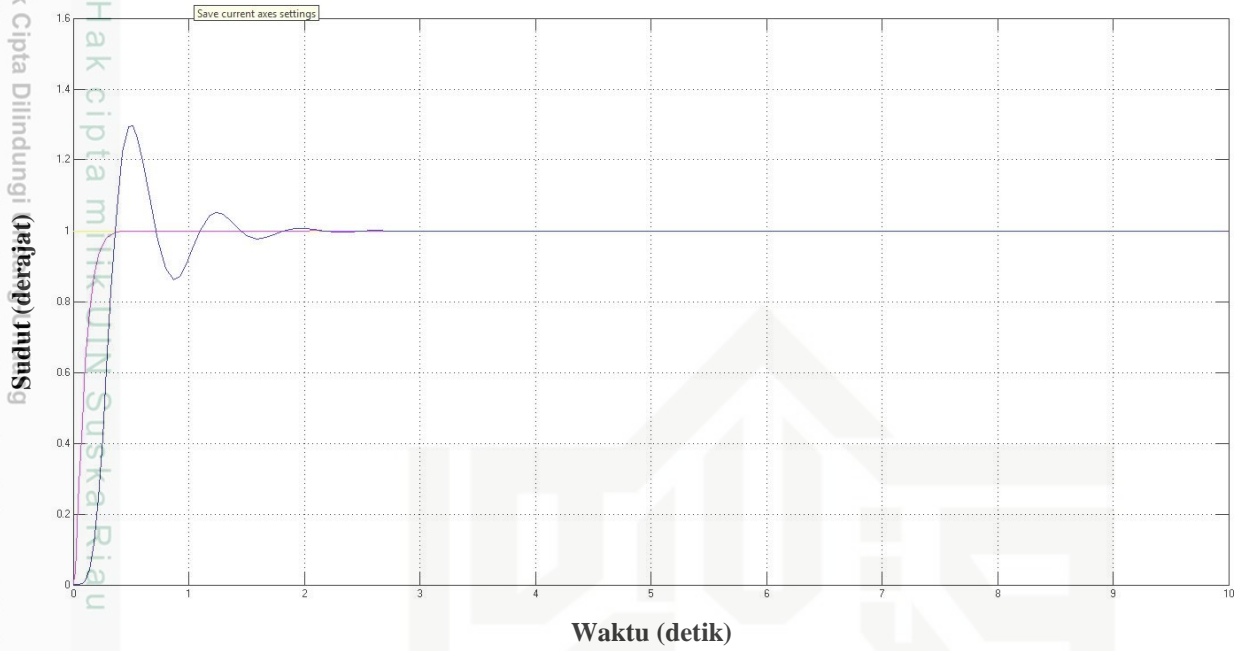
4. Hasil Simulasi MRAC dengan $\gamma_1 = 3, \gamma_2 = 1$



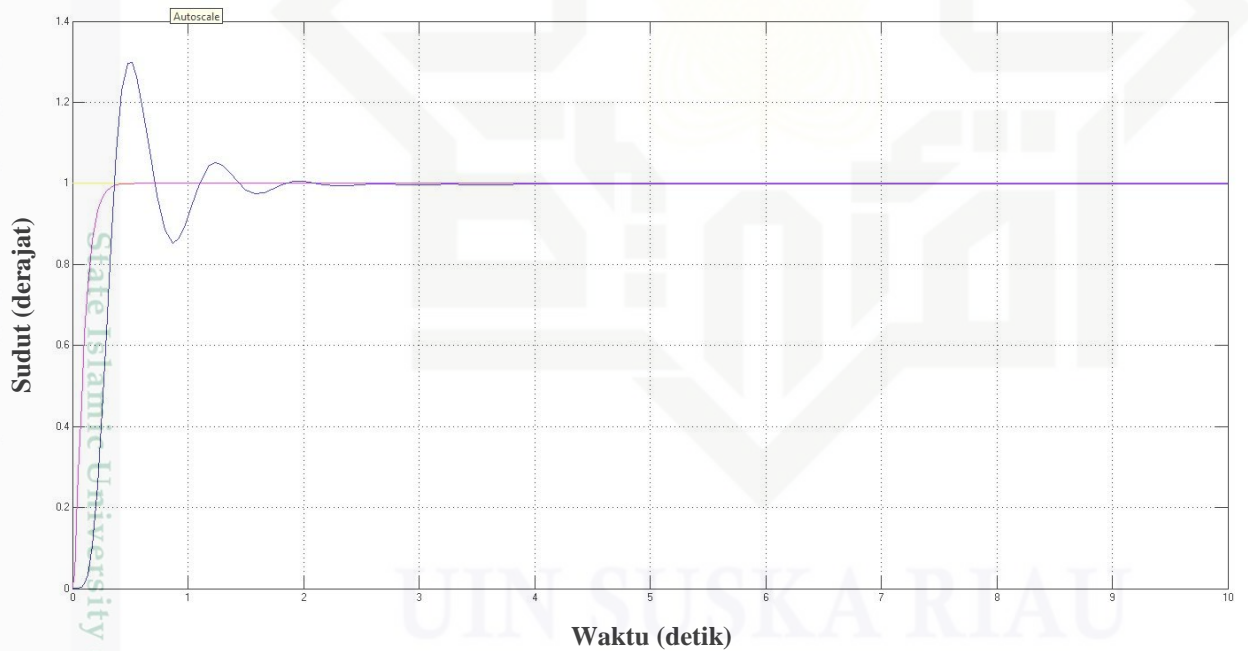
1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber:
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar UIN Suska Riau.
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin UIN Suska Riau.



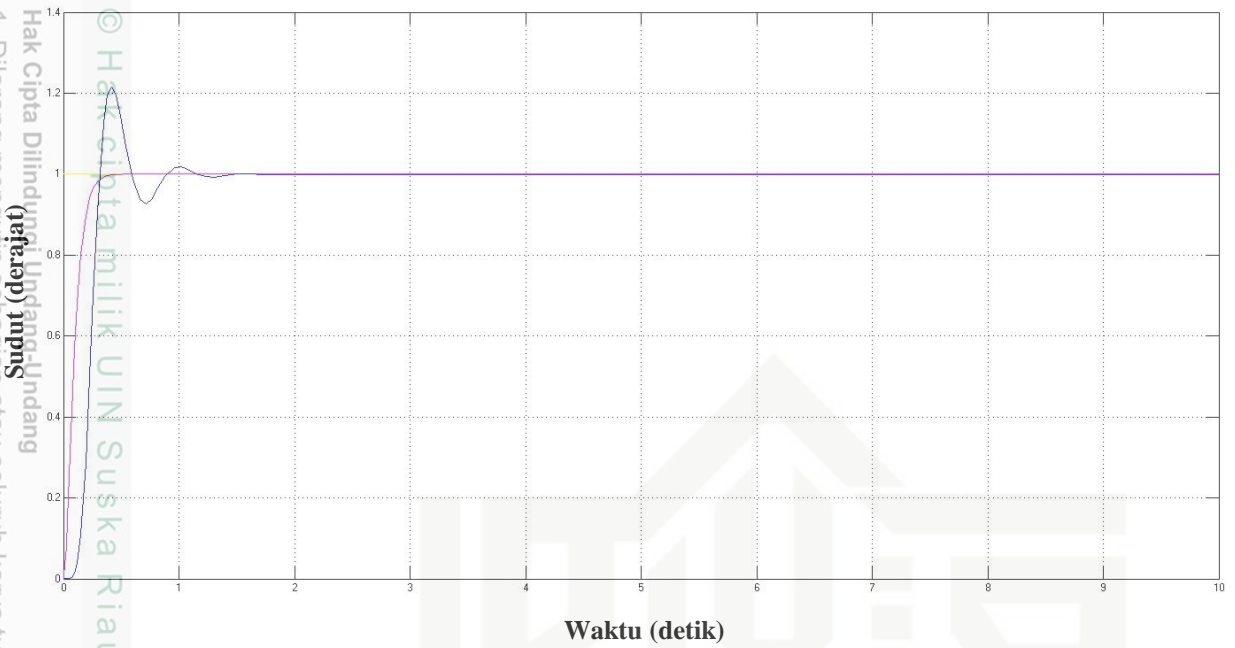
5. Hasil Simulasi MRAC dengan $\gamma_1 = -10, \gamma_2 = 3$



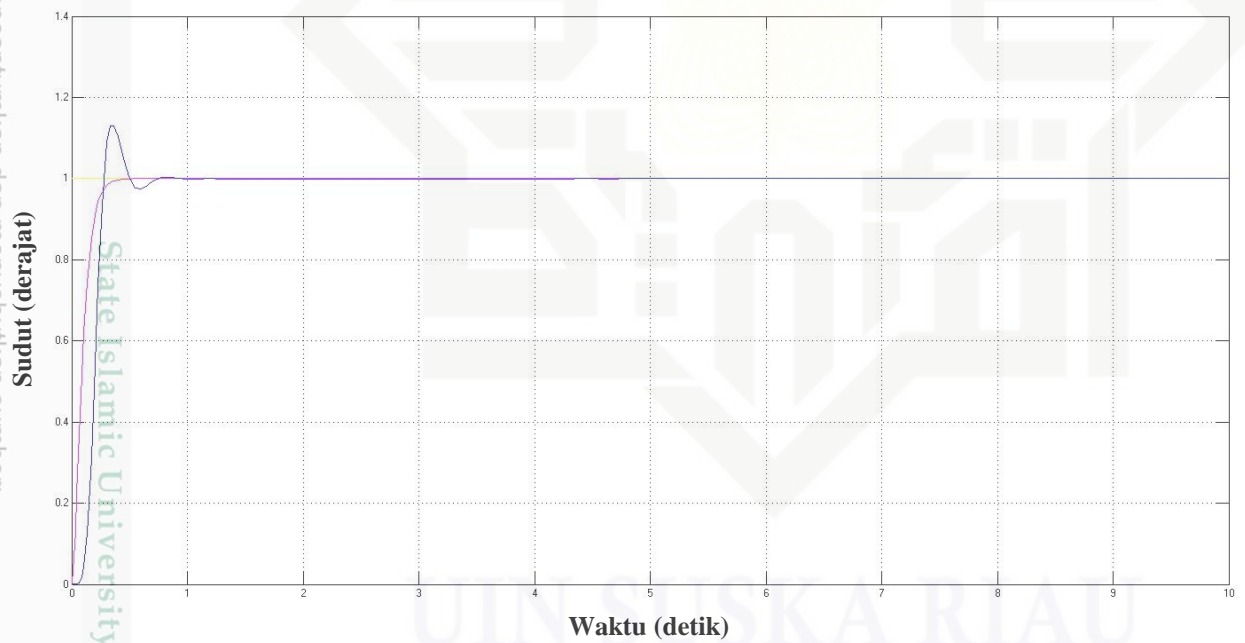
6. Hasil Simulasi MRAC dengan $\gamma_1 = -10, \gamma_2 = 10$



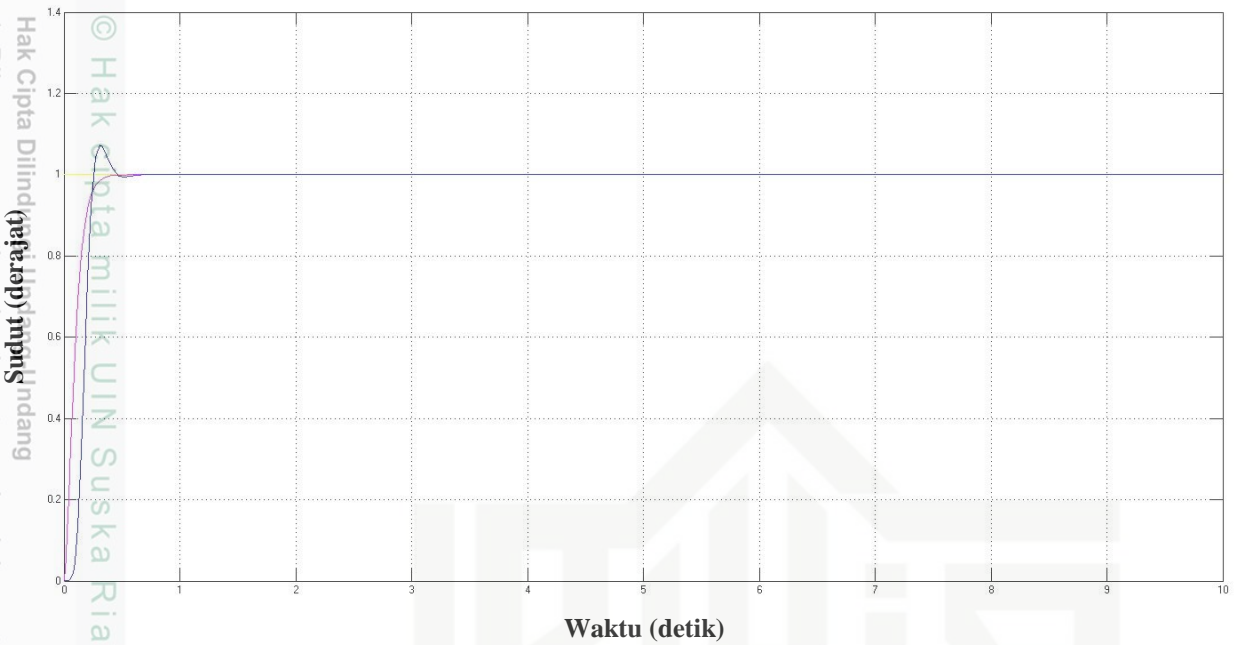
7. Hasil Simulasi MRAC dengan $\gamma_1 = -20, \gamma_2 = 20$



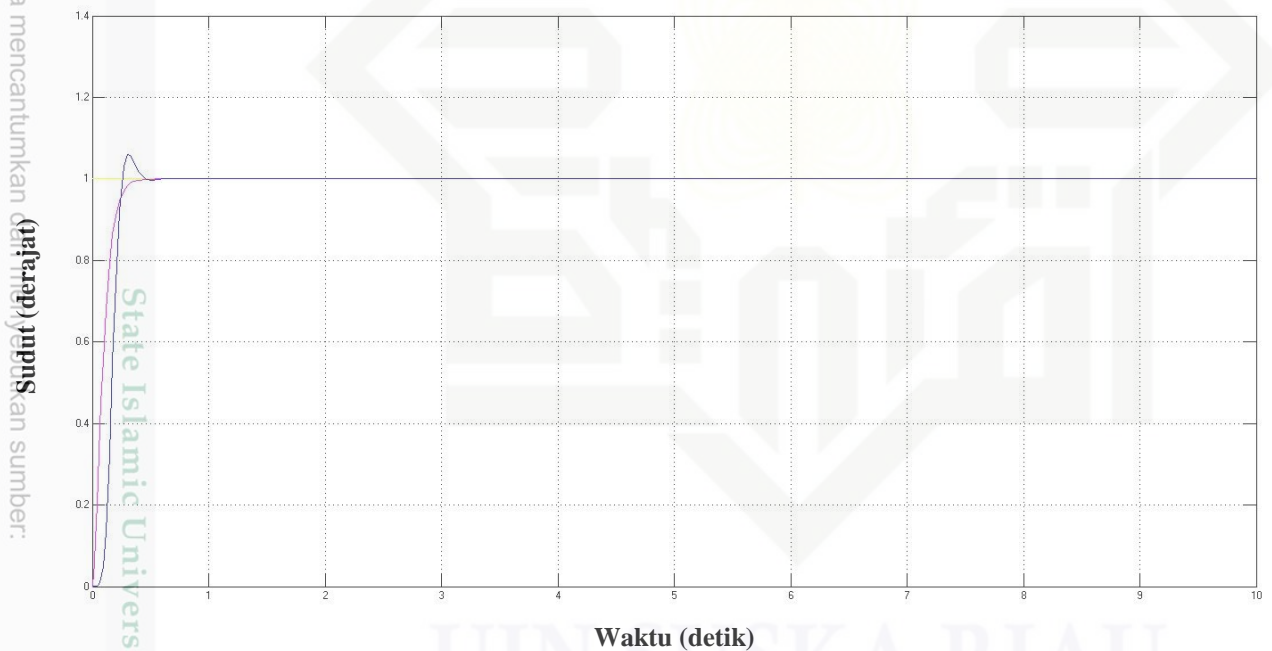
8. Hasil Simulasi MRAC dengan $\gamma_1 = -40, \gamma_2 = 30$



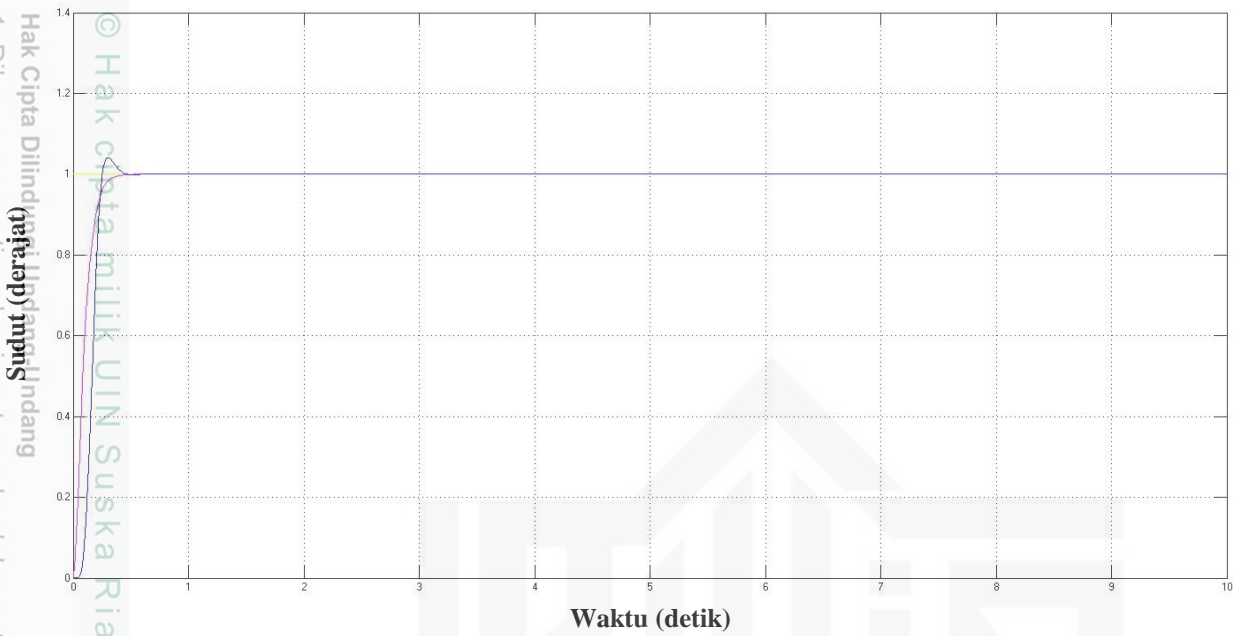
9. Hasil Simulasi MRAC dengan $\gamma_1 = -70, \gamma_2 = 50$



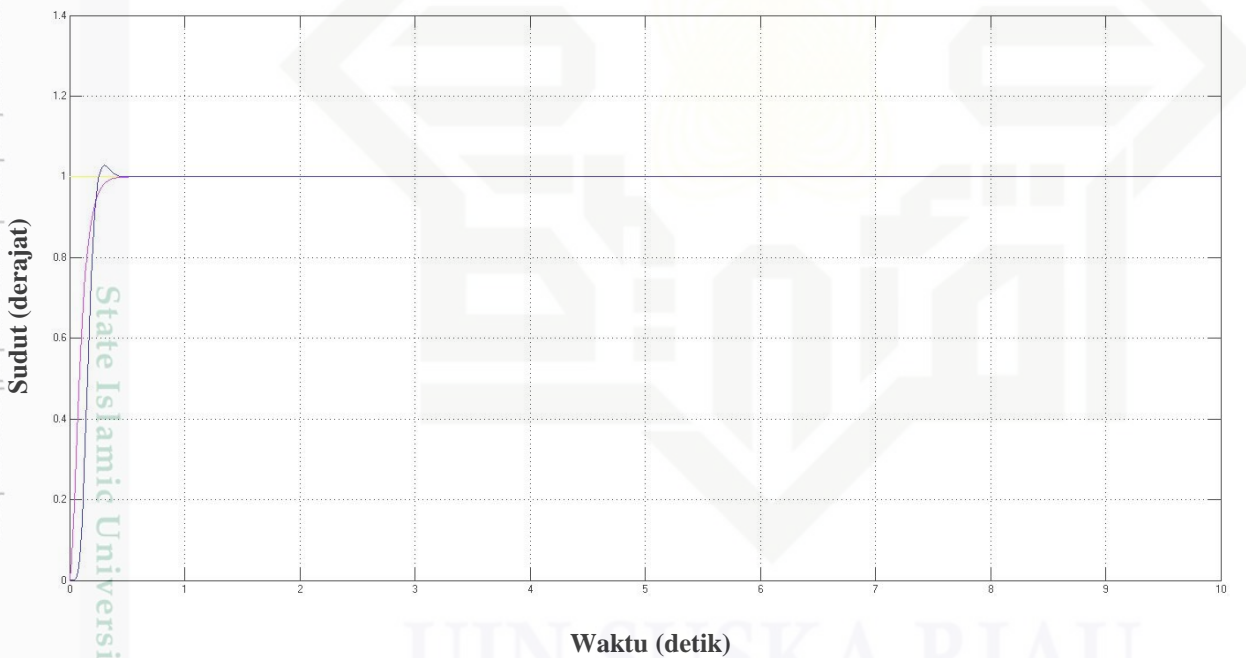
10. Hasil Simulasi MRAC dengan $\gamma_1 = -80, \gamma_2 = 55$



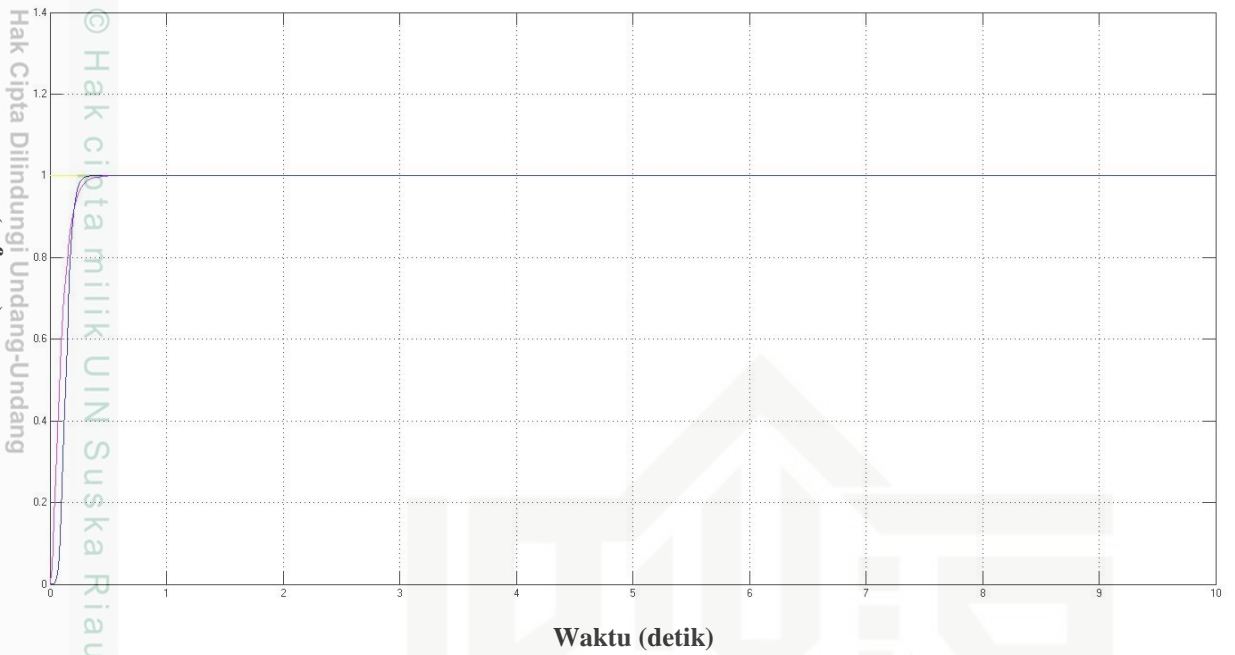
11. Hasil Simulasi MRAC dengan $\gamma_1 = 100, \gamma_2 = 63$



12. Hasil Simulasi MRAC dengan $\gamma_1 = -120, \gamma_2 = 70$



13. Hasil Simulasi MRAC dengan $\gamma_1 = -250$, $\gamma_2 = 130$



1. Dilarang mengutip atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber:
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar UIN Suska Riau.
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin UIN Suska Riau.

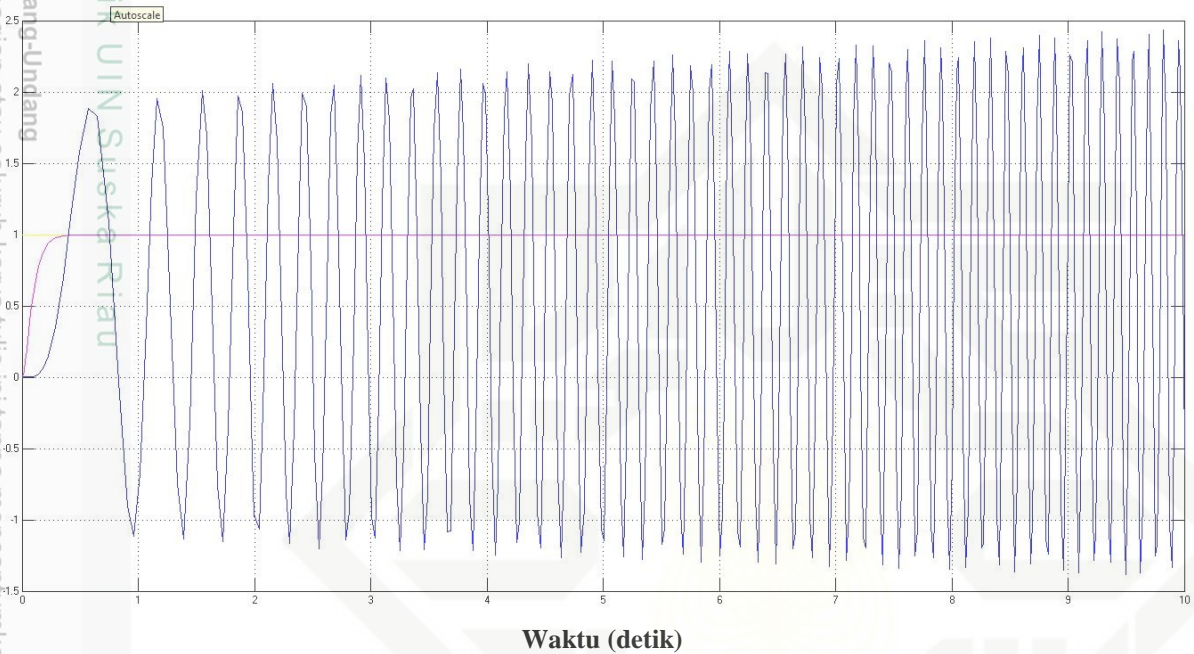


LAMPIRAN C

PROSES TUNING PARAMETER K_p DAN K_d PADA PENGENDALI MRAC KOMBINASI PD DENGAN METODE HEURISTIK PADA SISTEM *BALL AND BEAM*

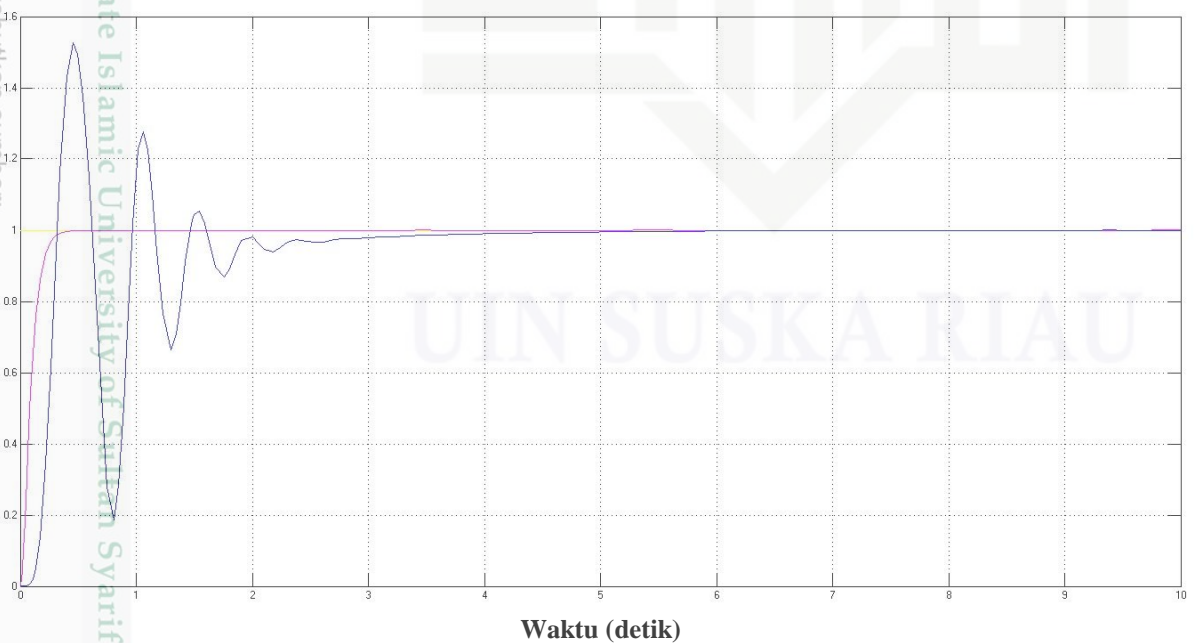
1. Respon Sistem dengan Menggunakan Pengendali MRAC Kombinasi PID dengan

$$\gamma_1 = -300, \gamma_2 = 150, K_p = 1, K_d = 0$$



2. Respon Sistem dengan Menggunakan Pengendali MRAC Kombinasi PID dengan

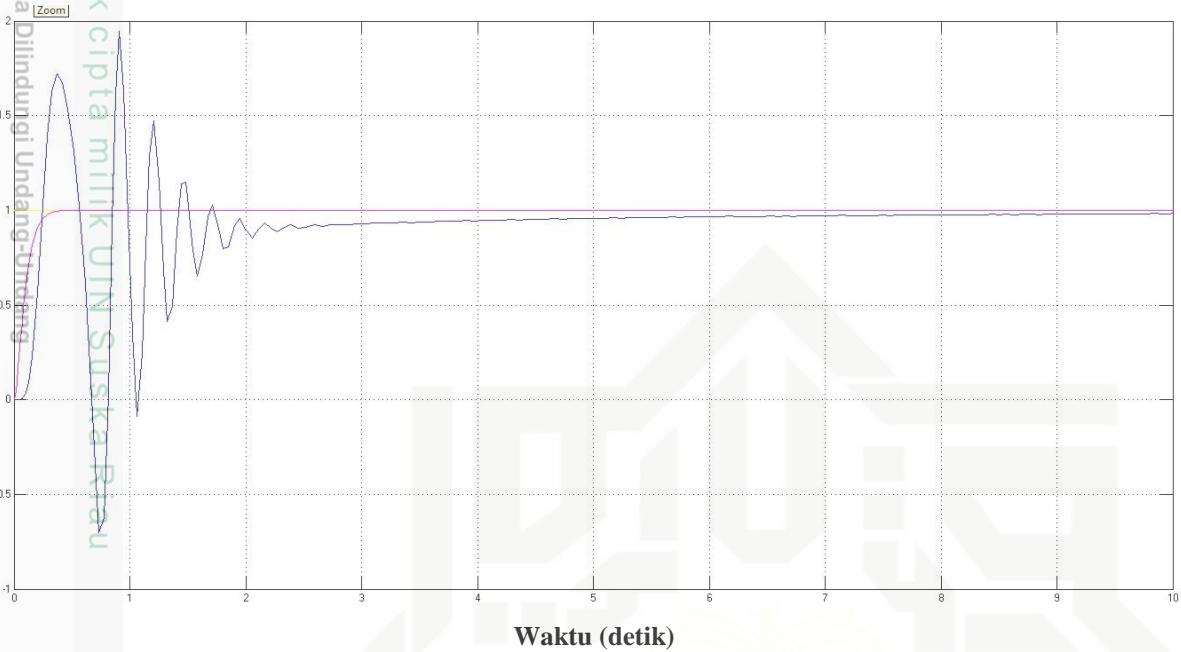
$$\gamma_1 = -300, \gamma_2 = 150, K_p = 3, K_d = 0.1$$





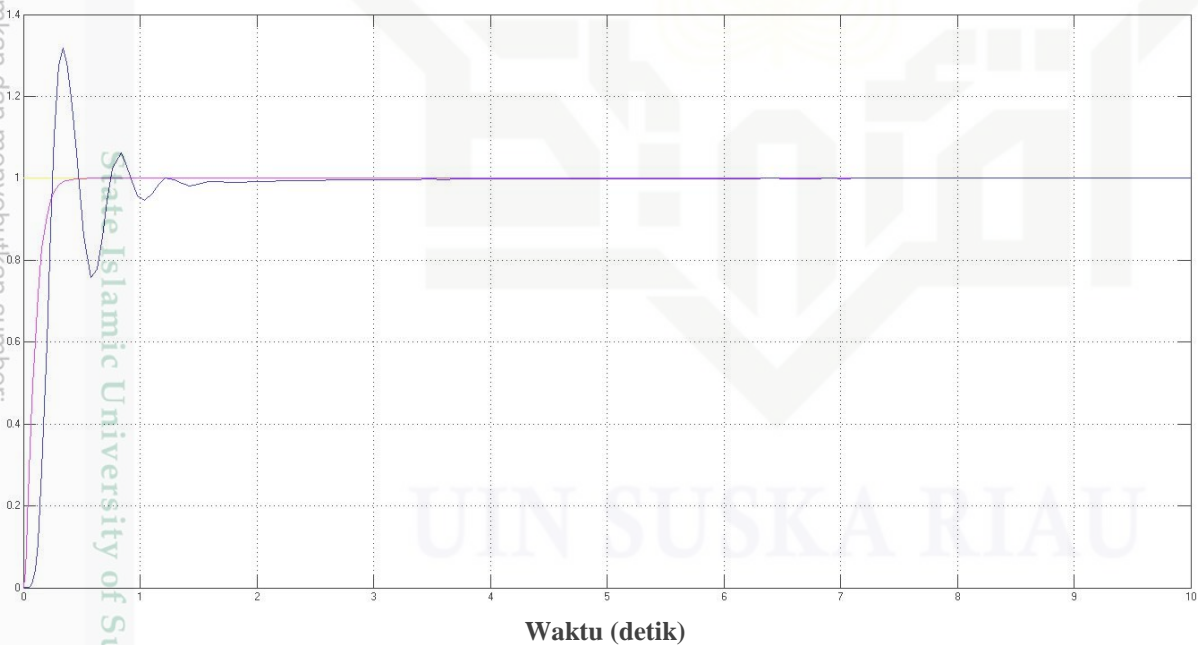
3. Respon Sistem dengan Menggunakan Pengendali MRAC Kombinasi PID dengan

$$\gamma_1 = -300, \gamma_2 = 150, K_p = 8, K_d = 0.1$$



4. Respon Sistem dengan Menggunakan Pengendali MRAC Kombinasi PID dengan

$$\gamma_1 = -300, \gamma_2 = 150, K_p = 10, K_d = 0.4$$





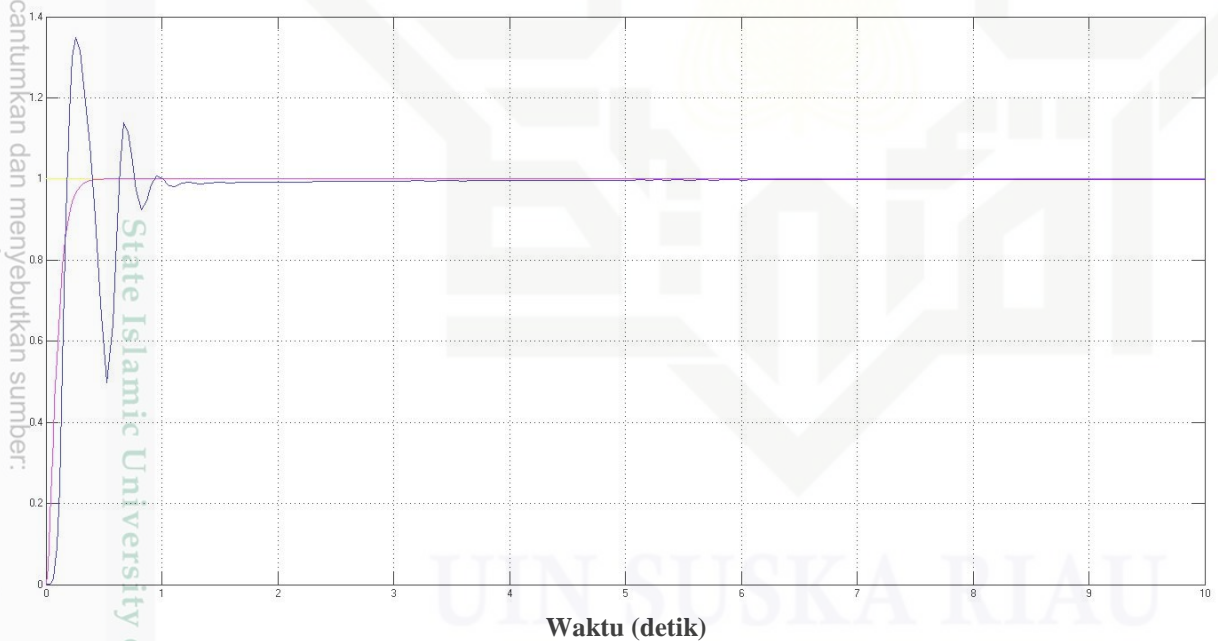
5. Respon Sistem dengan Menggunakan Pengendali MRAC Kombinasi PID dengan

$$\gamma_1 = -300, \gamma_2 = 150, K_p = 15, K_d = 0.9$$



6. Respon Sistem dengan Menggunakan Pengendali MRAC Kombinasi PID dengan

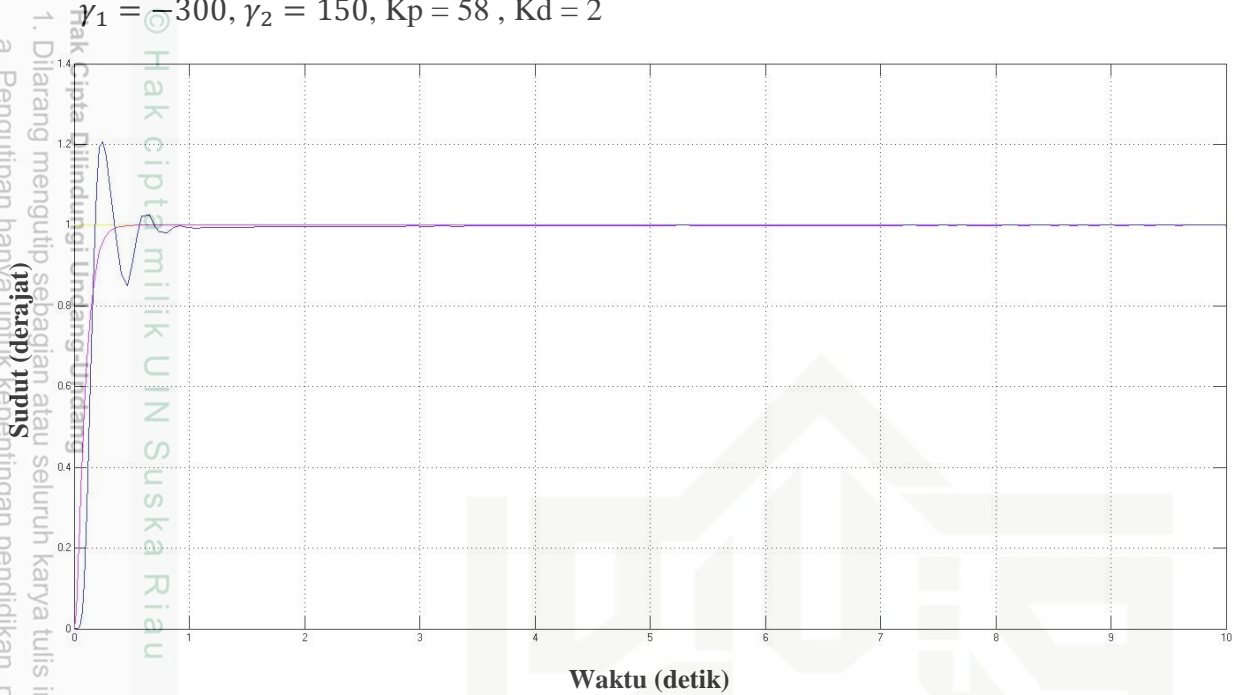
$$\gamma_1 = -300, \gamma_2 = 150, K_p = 35, K_d = 1$$





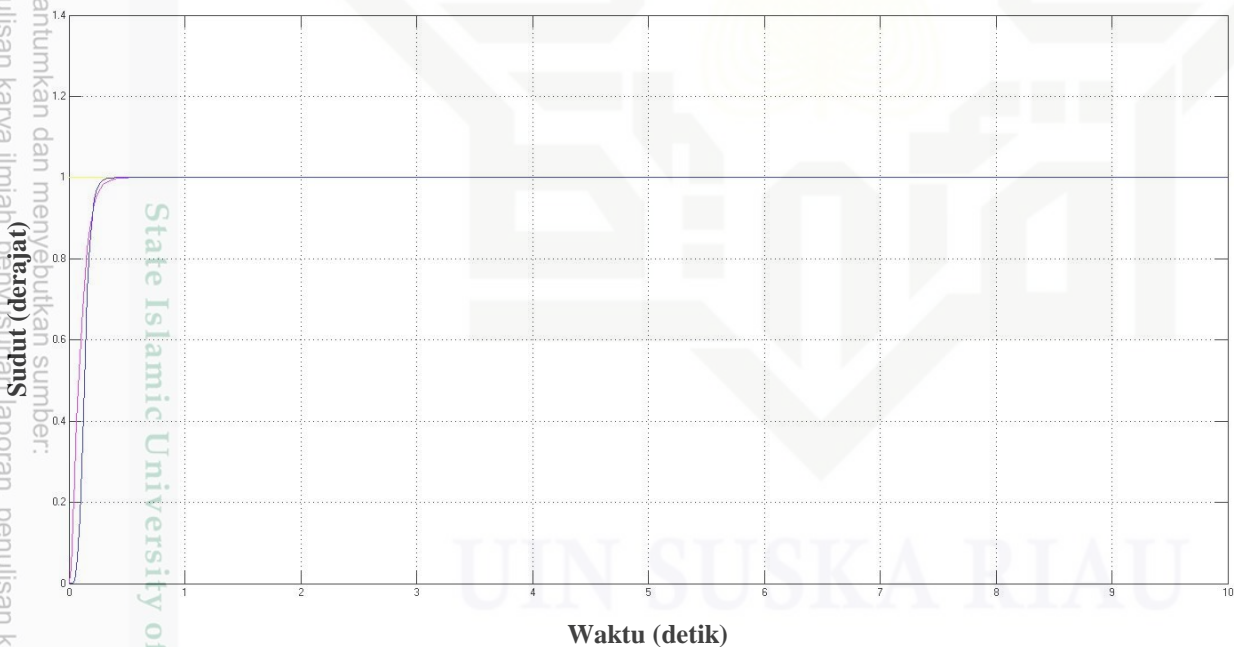
7. Respon Sistem dengan Menggunakan Pengendali MRAC Kombinasi PID dengan

$$\gamma_1 = -300, \gamma_2 = 150, K_p = 58, K_d = 2$$



8. Respon Sistem dengan Menggunakan Pengendali MRAC Kombinasi PID dengan

$$\gamma_1 = -300, \gamma_2 = 150, K_p = 62, K_d = 2.8$$





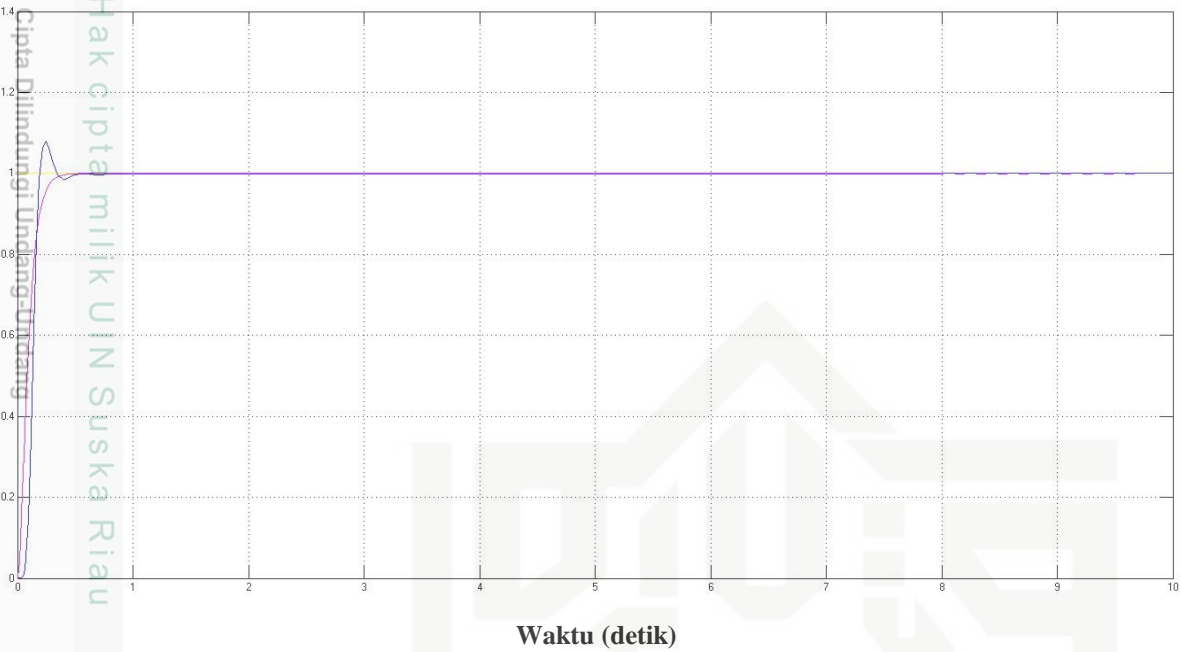
9. Respon Sistem dengan Menggunakan Pengendali MRAC Kombinasi PID dengan

$$\gamma_1 = -300, \gamma_2 = 150, K_p = 64, K_d = 3$$

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber:

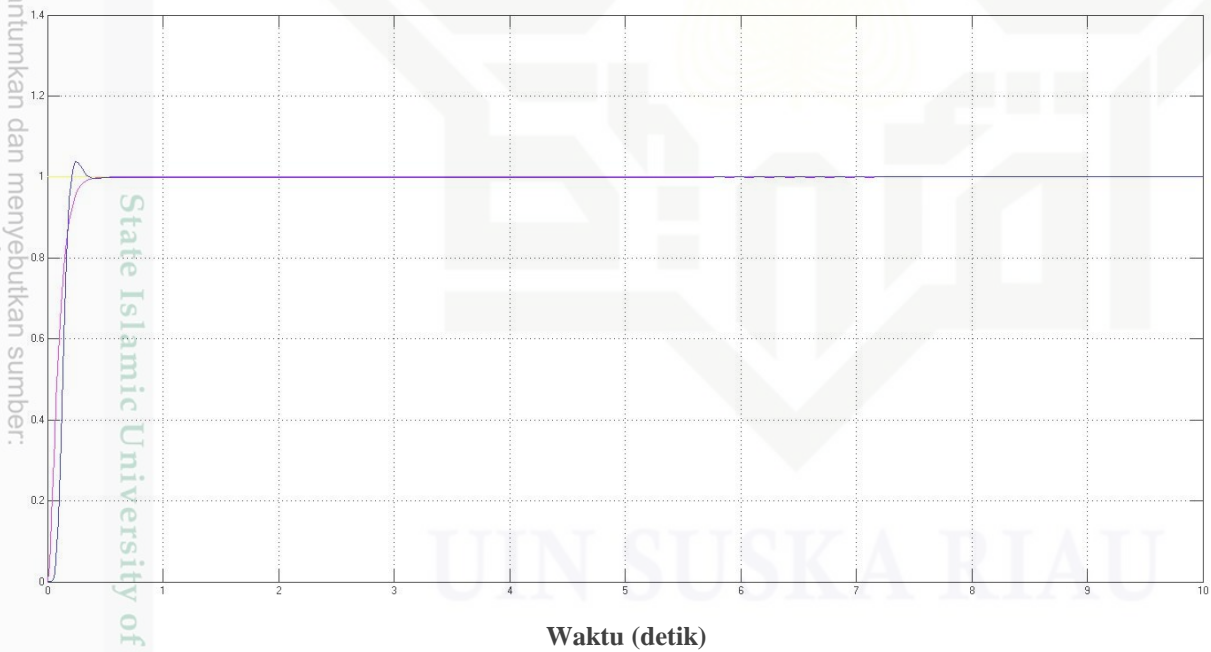
a. Pengutipan harus mencantumkan pendidikan, penelitian, pennisan karya ilmiah, dan sumber laporan, pennisan kritik atau tinjauan suatu masalah.

2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin UIN Suska Riau.



10. Respon Sistem dengan Menggunakan Pengendali MRAC Kombinasi PID dengan

$$\gamma_1 = -300, \gamma_2 = 150, K_p = 68, K_d = 3.5$$





11. Respon Sistem dengan Menggunakan Pengendali MRAC Kombinasi PID dengan

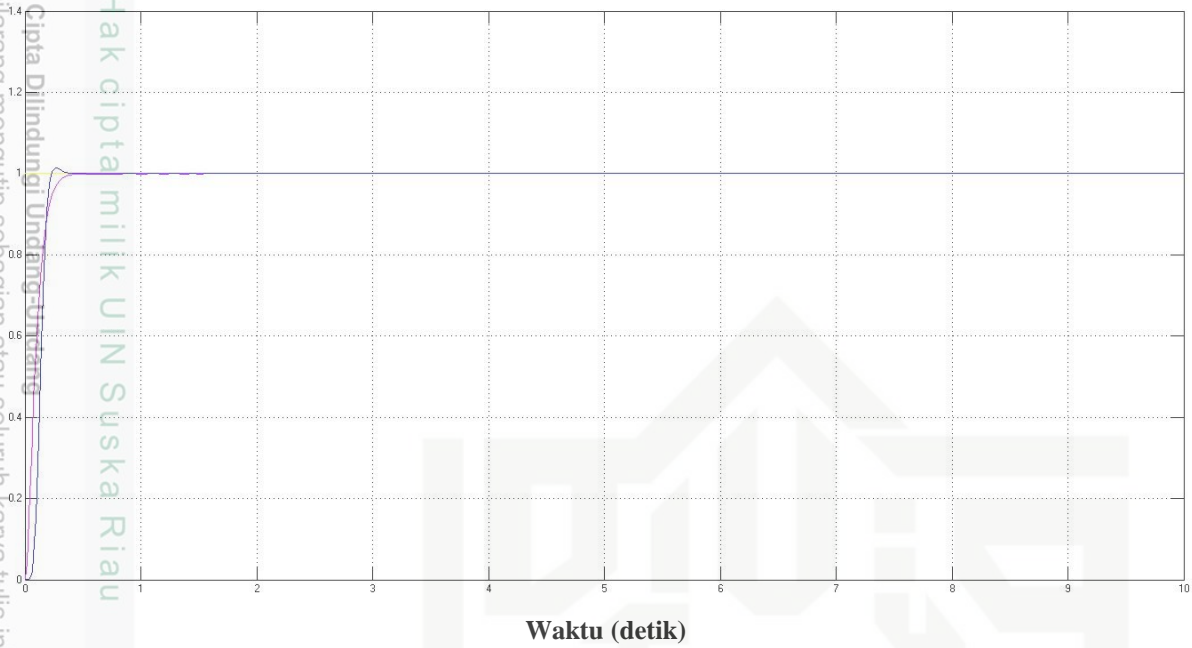
$$\gamma_1 = -300, \gamma_2 = 150, K_p = 72, K_d = 4$$

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber:

a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.

b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar UIN Suska Riau.

2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin UIN Suska Riau.



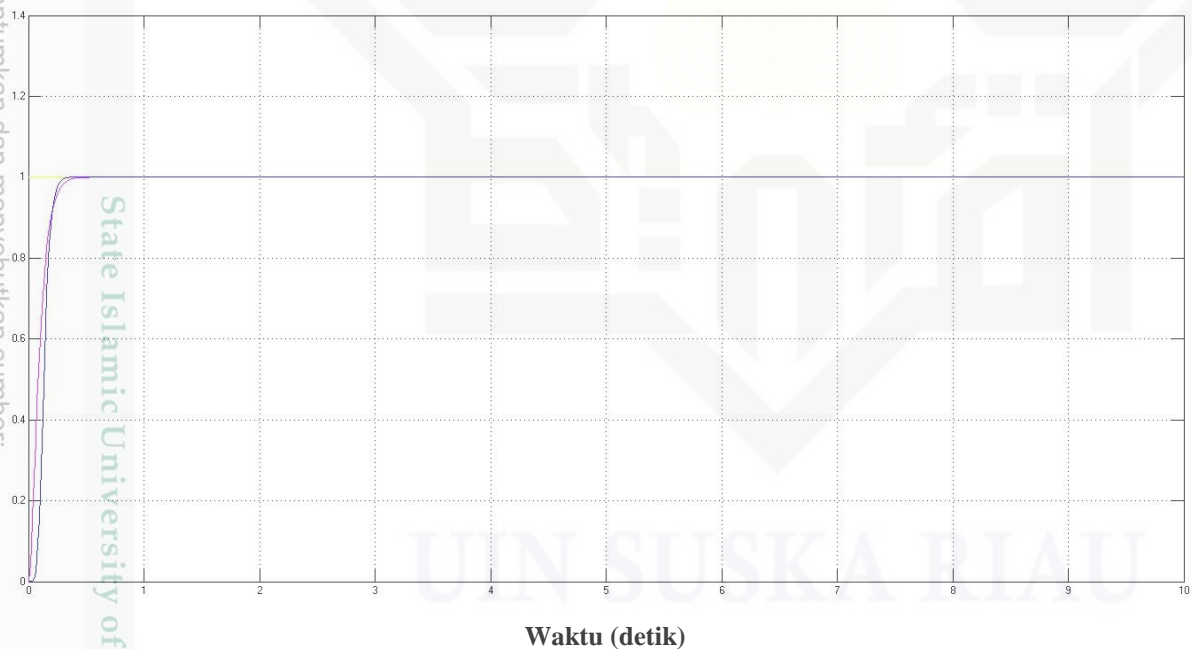
12. Respon Sistem dengan Menggunakan Pengendali MRAC Kombinasi PID dengan

$$\gamma_1 = -300, \gamma_2 = 150, K_p = 75, K_d = 4.7$$

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber:

a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.

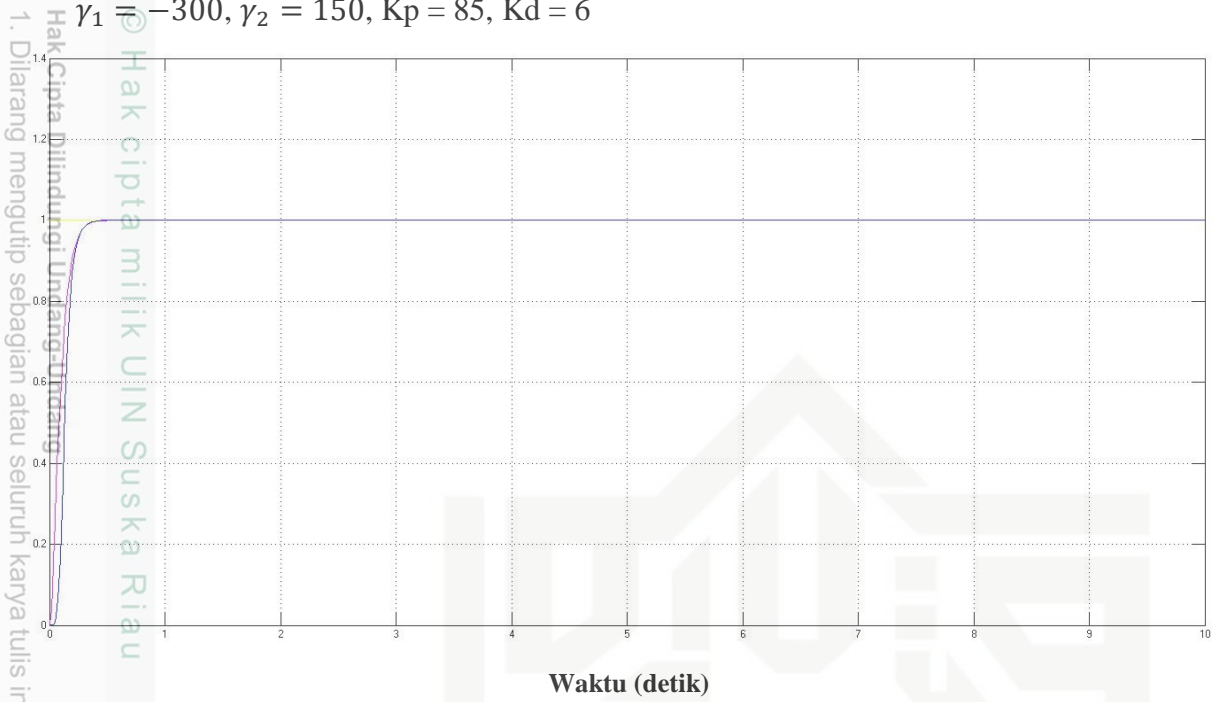
b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar UIN Suska Riau.





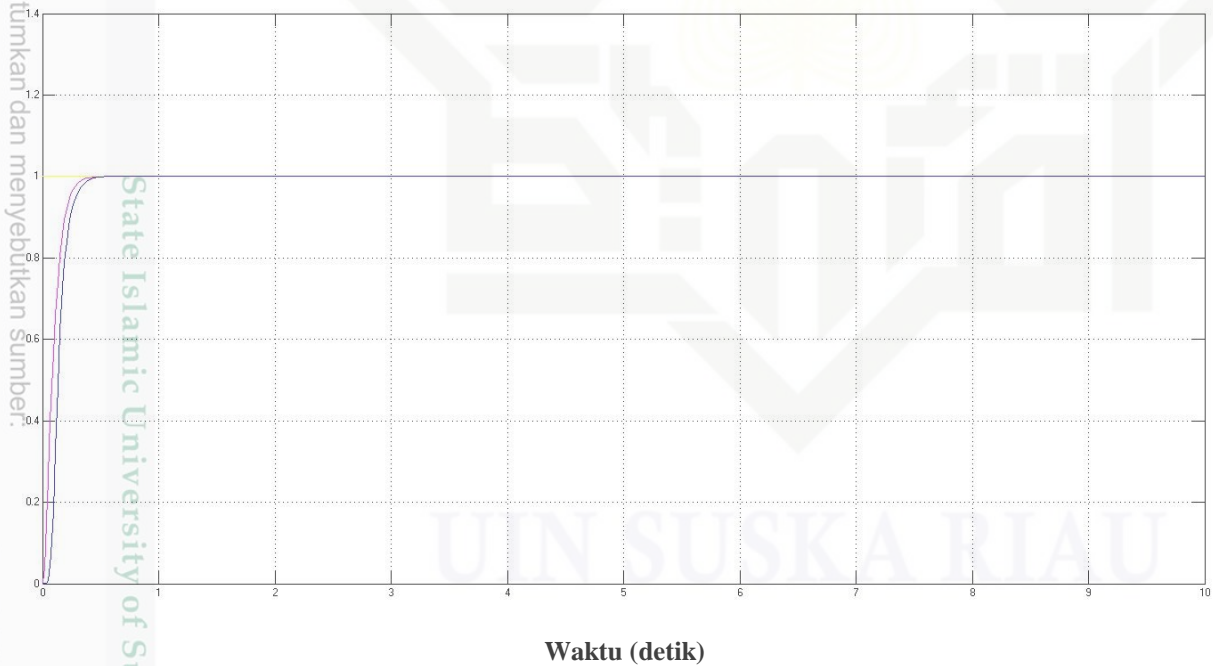
13. Respon Sistem dengan Menggunakan Pengendali MRAC Kombinasi PID dengan

$$\gamma_1 = -300, \gamma_2 = 150, K_p = 85, K_d = 6$$



14. Respon Sistem dengan Menggunakan Pengendali MRAC Kombinasi PID dengan

$$\gamma_1 = -300, \gamma_2 = 150, K_p = 90, K_d = 7$$





DAFTAR RIWAYAT HIDUP



Dimas Prasetyo, lahir di pekanbaru pada tanggal 04 Desember 1995 merupakan anak kedua dari tiga bersaudara yang beralamat di Jl. Kampar ,Pekanbaru

email : newdimasd@gmail.com

HP : 0899 000 8557

Jenjang pendidikan yang dilalui dimulai pada Sekolah Dasar di SD Negeri 016 Sekip tahun 2001 dan melanjutkan di SMP Negeri 10 Pekanbaru tahun 2007. Setelah menyelesaikan pendidikan di SMP, pendidikan dilanjutkan di SMK Negeri 2 Pekanbaru tahun 2010. Kemudian melanjutkan studi di Jurusan Teknik Elektro Fakultas Sains dan Teknologi UIN SUSKA Riau pada konsentrasi Elektronika dan Instrumentasi tahun 2013 dengan penelitian Tugas Akhir berjudul “Desain pengendali *Model Reference Adaptive Control* (MRAC) dengan kombinasi PD untuk mengendalikan keseimbangan pada sistem *ball and beam*”.

Hak Cipta Dilindungi Undang-Undang

© Hak Cipta Teknik UIN SUSKA RIAU

State Islamic University of Sultan Syarif Kasim Riau

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber:
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar UIN Suska Riau.
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin UIN Suska Riau.